

考量死亡有機物與木製品碳釋放下 之土地期望價值與最適輪伐期

徐寬^{*}、柳婉郁^{**}

過去文獻對於碳交易市場對土地期望價值與最適輪伐期之影響已有相當多的研究，但前人研究缺乏考量製成木製傢俱等用材在未來使用中逐漸分解情況，及土壤碳匯之碳吸存與碳釋放部分，故本研究以杉木為例進行模擬分析，進行四種情境土地期望價值與最適輪伐期之分析，土地期望價值情境包括：(1) 僅考慮木材收入、(2) 考慮木材收入與地上部碳匯收入、(3) 考慮木材收入、地上部碳匯收入、地下部土壤碳釋放支出、(4) 考慮木材收入、地上部碳匯收入、地下部土壤碳釋放支出、傢俱用材碳釋放支出。其次，本研究利用敏感度分析確定各項因素變動下對土地期望價值與最適輪伐期之影響。結果顯示在台灣建議碳價格之下四種不同情境之土地期望價值分別為每公頃 4,370,167 元、6,545,936 元、5,924,128 元及 4,895,334 元，碳交易市場的存在可讓土地期望價值上升 12% 至 50%。而從敏感度分析結果可看出土地期望價值受到碳價格、碳釋放比例及折現率三者有甚大影響，碳價格與折現率的上升會縮短最適輪伐期，當碳價格超過每公頃 3,573 元之後，但考慮土壤與傢俱用材的碳釋放後，可使這樣的情況減緩。以台灣目前的林業現況，僅考慮地上部碳匯收入，最高可讓土地期望價值增加 50%，但會增加土地期望價值對於折現率的敏感度，增加林業經營的風險。考量土壤與傢俱用材碳釋放後，可使上述情況得到改善，雖然土地期望價值上升幅度降為 12%，但卻大幅降低折現率對於最適輪伐期與土地期望價值的影響力，同時隨著碳價格的上升，越能增加林主

* 國立中興大學森林學系專任研究助理。

** 國立中興大學森林學系專任副教授，通訊作者。Email：wyliu@nchu.edu.tw。電話：04-22850158。

將伐材作為傢俱，持續發揮森林碳儲存效益的誘因，甚至能延長最適輪伐期。綜合以上，本研究建議政府未來應建立碳匯市場時，碳價格不宜超過每公頃 3,573 元，碳匯市場中森林碳匯之計算方式，應同時考慮地上部碳匯收入、土壤之死亡有機物與傢俱用材碳釋放，才能較正確地反映出森林經營完整的經濟效益。

關鍵詞：碳吸存、碳釋放、土地期望價值、最適輪伐期

I、前 言

氣候變化目前已成為一個受到全球關注的議題，不僅對自然環境造成影響，使得自然棲地縮小、特定物種絕種、海平面上升等等，對全球經濟也會造成傷害 (Zhou & Gao, 2016; Liu, 2016; 曾憲郎、魏惠君, 2014)。若是溫室氣體維持目前的上升速率，對全球經濟產生的經濟衝擊之淨現值相當於全球 2001 年國內生產毛額 (gross domestic product, 以下簡稱 GDP) 的 1.10 倍；若是溫室氣體上升速率加快，經濟衝擊將會上升至 1.73 倍 (Estrada、Tol & Gay-García, 2015)。

世界各國為避免氣候變化持續惡化，於 1997 年的第 3 次聯合國氣候變化綱要公約締約國會議 (The Third Conference of the Parties, 以下簡稱 COP3) 中通過京都議定書 (Kyoto Protocol)，而目前有 192 個締約國 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2017a)。其目標為要求已開發國家於 2012 年將溫室氣體的總排放量降低至 1990 年平均排放量並再減少 5% 的排放量，而溫室氣體被歸類為以下六項：二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、氧化亞氮 (N₂O)、氫氟碳化物 (HFCS)、全氟化碳 (PFCS) 及六氟化硫 (SF₆) (United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998)。該議定書中的第二、三及十七條特別提到各國因新植造林、更新造林及森林伐採 (afforestation, reforestation, deforestation, 以下簡稱 ARD) 所產生的碳匯與碳排放可以列入減量計算，以及各國亦可透過碳交易 (emissions trading, 以下簡稱 ET) 取得減量計算，為森林資源首次在氣候變化的議題中顯示出其重要性 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998; Core Writing Team、Pachauri & Reisinger, 2008; Strassburg *et al.*, 2010; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016; 林國慶、柳婉郁, 2013)。

巴黎協議 (Paris Agreement) 於 2015 年的第 21 次聯合國氣候變化綱要公約締約國會議 (The Twenty-first Conference of the Parties, 簡稱 COP21) 中通過，是世界首次最多國家同意的協議，目前 197 個簽署國中已有 143 個國家批准 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2017b)。其目標為將全球平均氣溫升幅控制在工業化前水平以上 2°C 以內，並致力於將全球平均氣溫升幅限制在工業化前水平以上 1.5°C 以內，而與京都議定書不同，巴黎協議的各個締約國之減量標準改由各締約國自主制定，已開發國家需提出各自的國家自定貢獻 (Intended Nationally Determined Contributions, 以下簡稱 INDC)，而開發中國家需提出各自的國家適當減緩行動 (nationally appropriate mitigation actions, 簡稱 NAMA)，以期望於 2020 年能達成減量目標 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015)，巴黎協議共計 29 條條文，其中第五條條文中指出，締約國應加強溫室氣體碳匯，包括造林，並鼓勵建立碳匯交易機制與環境給付機制來獎勵造林地主，獎勵對象為減少毀林和森林退化排放、增加碳吸存、增加碳保存之作為、永續管理森林；同時重申與相關適當獎勵機制及非碳利益的重要性。顯示造林與碳匯在永續發展與管理上的重要性。

而我國政府為改善氣候變化的情況推行減緩與調適政策，於 2015 年 7 月 1 日正式實施溫室氣體減量及管理法，訂立於 2050 年我國之溫室氣體排放量降為 2005 年排放量的 50% 以下之目標，並在第三條指出「碳匯指將 CO_2 自排放單元或大氣中持續分離後，吸收或儲存之樹木森林土壤海洋地層設施或場所，交易指進行總量管制時，排放額度於國內外之買賣或交換。排放額度指進行總量管制時，允許排放源於期間排放 CO_2 當量的額度；此額度得取自政府核配、拍賣、配售、先期專案、抵換專案、效能標準或交易；一單位之排放額度相當於允許排放一公噸 CO_2 當量。」第八條聲明政府要推動森林資源管理強化碳吸收功能及建立溫室氣體總量管制、抵換、拍賣、配售及交易制度。而第二十一條中則提到事業透過碳交易取得之排放額度應以來自國

內為優先，顯示出未來國內森林資源所生產的固碳效益在碳交易市場中的重要性（行政院環境保護署，2015）。

森林具有透過林產物的碳儲存及森林碳匯，減少大氣中溫室氣體的效益已為大眾所接受（Bigsby，2009；Man *et al.*，2013）。而前人已有相當多關於碳匯對於森林經營決策影響之研究，綜合大部分的研究結果皆顯示，存在碳匯市場確實可以提高林地的期望價值（land expectation value，以下簡稱LEV），但對於林主的經營決策是否產生影響則是取決於碳價格等其他因素（Manley & Maclaren，2012；Zhou & Gao，2016；Nguyen & Nghiem，2016；林國慶、柳婉郁，2007；柳婉郁、盧又銘、林國慶，2009；林俊成、柳婉郁，2010；曾憲郎、魏惠君，2014）。另外亦有學者提出因為林業是長期經營的事業，由於未來材價之不確定性及無法預期災害等因素，導致林主們傾向在最適輪伐期之前就對森林進行收穫（Manley & Maclaren，2012）。

在森林經營管理決策中，牽涉到兩大層面，第一為土地期望價值高低，第二為輪伐期時間決策，其中，土地期望價值涵蓋範圍甚廣，從 Faustmann 模型、Hartman 模型以來已經有許多研究分析，但在實證研究中沒有考慮碳價格、土壤死亡有機物、以及木製品碳釋放比率等不同因素。其中，Zhou 與 Gao（2016）之研究雖有考量木材收獲時的碳釋放比例，但是缺乏考量製成木製傢俱等用材在未來使用中逐漸分解所產生之碳釋放，其研究有提出應計算木製傢俱等用材在未來使用中逐漸分解所產生之碳釋放，以及國際碳匯市場碳價格對地位指數較低之林地之最適輪伐期具有影響力，但對地位指數較高之林地之最適輪伐期則無影響力。近期台灣林務局推行短期經濟造林獎勵政策，亦牽涉許多森林經營管理之問題，故本研究延伸 Zhou 與 Gao（2016）之研究，進一步建立四種情境之理論模型，以杉木為例進行模擬分析，土地期望價值包括：(1) 僅考慮木材收入、(2) 考慮木材收入與地上部碳匯收入、(3) 考慮木材收入、地上部碳匯收入、地下部土壤碳釋放支出、(4) 考慮木材收入、地上部碳匯收入、地下部土壤碳釋放支出、傢俱用材碳釋放支

出之土地期望價值。本研究針對此問題，計算杉木經濟林在不同情境下之碳匯市場在之土地期望價值與最適輪伐期，供未來政府林業部門規劃相關政策參考之用。同時為了達到更精確的分析，本研究透過敏感度分析確定各項因素變動下對於土地期望價值與最適輪伐期之影響，以期望本研究之結果能供未來政府建立台灣溫室氣體交易制度之碳匯計算方式參考。

II、理論模型

本研究將土地期望價值分為林木效益與非林木效益，其中非林木效益以碳匯效益為主，前者為木材收入，後者則包含地上部碳匯收入以及死亡有機物之碳釋放支出，將以上三部分之價值合併計算以求得土地期望價值。而最適輪伐期定義為能使土地期望價值最大之輪伐期。本研究假設林主的決策受到林木價值與碳匯價值的影響，且木材價格、碳價格、林木的生長模式以及折現率皆處於一個穩定、不隨時間變化的情況下，所以考慮無窮期經營的最適輪伐期並不會隨時間改變。單位面積上的地上部生物量以 $B_F(t)$ 做表示，而單位面積上的主幹的生物量以 $B_S(t)$ 表示，且生物量擴展係數（biomass expansion factors，以下簡稱 BEF）與林齡無關，因此 $B_F(t) = BEF \cdot B_S(t)$ 在任一時間皆成立。

2.1 林木效益之模型

本研究以 $V(t)$ 表示 t 時單位面積上之材積， φ 為收穫率，而在 t 時單位面積所收穫的材積表示為 $H(t) = V(t)\varphi$ 。因此單位面積林木價值的淨現值可表示為：

$$W_T(P_T, T) = e^{-\rho T} [P_T H(T) - C_a] - C_e \quad (1)$$

W_T 為單位面積林木價值的淨現值 (NTD/ha)； P_T 為 T 年時的木材價格 (NTD/m³)； ρ 為折現率； $H(T)$ 為 T 時單位面積所收穫的材積 (m³/ha)； C_a 為單位面積的收穫成本 (NTD/ha)； C_e 為單位面積的造林成本 (NTD/ha)。

2.2 考慮地上部碳匯效益之模型

地上部生物量所累積的碳匯收入之淨現值表示為：

$$W_B(T, P_C) = P_C \int_0^T CFE e^{-\rho t} B'_F(t) dt = P_C \int_0^T CF BEF e^{-\rho t} B'_s(t) dt \quad (2)$$

W_B 為單位面積地上部碳匯收入的淨現值 (NTD/ha)； P_C 為碳價格 (NTD/tCO₂)； $B'_F(t)$ 單位面積上的地上部生物量之變化率 (t/ha)； $B'_s(t)$ 為單位面積上主幹的生物量之變化率 (t/ha)； ρ 為折現率； CF 為碳含量比例 (carbon fraction of dry matter，以下簡稱 CF) (tCO₂/t)； BEF 為生物量擴展係數。

在林地進行收穫後雖然將收穫的木材視為立即的碳釋放，但是並非所有收獲得木材皆會列入計算，被製成木製傢俱的木材依然可以持續發揮森林碳儲存的效益，所以這部分是可以不列入碳排放計算的。本研究假設 θ 為碳釋放比例表示收穫中的木材有多少百分比並非製成木製傢俱，所以在收穫的木材中製成木製傢俱的木材可以表示為 $M(T) = (1 - \theta)H(T)$ 。而收穫時因碳排放所要繳交的碳稅則可以表示為：

$$C_{SP}(T, P_C, \theta) = e^{-\rho T} P_C [\theta H(T) \pi] \quad (3)$$

C_{SP} 為單位面積收穫碳稅之淨現值 (NTD/ha)； P_C 為碳價格 (NTD/tCO₂)； θ 為碳釋放比例； $H(T)$ 為 T 時單位面積所收穫的材積 (m³/ha)； π 為單位材積所含的碳量 (tCO₂/m³)； ρ 為折現率。

2.3 考慮死亡有機物碳釋放之模型

死亡有機物包含枯立木、枯落物及土壤中的死亡有機物。假設 $N(t)$ 為 t

時土壤中死亡有機物所含的碳量，由於林地在造林前的死亡有機物含碳量對最適輪伐期並不會造成影響，故本研究假設 $N(t) = 0$ (Holtsmark、Hoel & Holtsmark, 2013)。死亡有機物是由地上部生物量轉換而來，其轉換速率為 γ ，而分解速率為 δ ，則土壤死亡有機物含碳量在 t 時的變化率則可表示為 $N'(t) = \gamma B_F(t) - \delta N(t)$ ，而土壤死亡有機物含碳量則可表示為：

$$N(t) = e^{-\delta t} \gamma \int_0^t BEF e^{\delta t} B_S(t) dt \quad (4)$$

$N(t)$ 為 t 時單位面積土壤死亡有機物含碳量； δ 為土壤中死亡有機物之分解速率； γ 為地上部生物量轉換速率； BEF 為生物量擴展係數； $B_S(t)$ 為主幹的生物量。

而土壤死亡有機物的分解同時也會造成碳釋放，在一個輪伐期中土壤死亡有機物分解所需要的碳稅支出則表示為：

$$C_D(T, P_C) = \int_0^T e^{-\rho t} P_C (CF \delta N(t)) dt + e^{-\rho T} \int_0^\infty e^{-\rho t} P_C (CF \delta e^{-\rho t} N(T)) dt \quad (5)$$

C_D 為單位面積土壤死亡有機物之碳稅淨現值 (NTD/ha)； P_C 為碳價格 (NTD/tCO₂)； CF 為碳含量比例 (tCO₂/t)； δ 為土壤中死亡有機物之分解速率； $N(t)$ 為 x 時土壤死亡有機物含碳量； $N(T)$ 為輪伐期時土壤死亡有機物含碳量； ρ 為折現率。

土壤死亡有機物之碳稅之淨現值分為兩個部分，模型的前半部分為在輪伐期中碳釋放的價值，而後半部分則是在收穫後的碳釋放價值。在經過第一次收穫後留在林地上的枝條等地上部生物量會以 δ 得速率分解，因此留在林地上的枝條等地上部生物量可以 $e^{-\delta t} [B_F(T) - B_H(t)]$ 表示，而分解釋放出的碳量可表示為 $\delta e^{-\delta t} CF [B_F(T) - B_H(t)]$ ，因此其碳釋放價值可表示為：

$$C_H(T, P_C, \delta) = e^{-\rho} P_C^T \int_0^\infty e^{-\rho t} \delta e^{-\delta t} CF [B_F(T) - B_H(t)] dt \quad (6)$$

C_H 為單位面積未收穫枝條之碳稅淨現值 (NTD/ha)； P_C 為碳價格

(NTD/tCO₂)；CF 為碳含量比例 (tCO₂/t)；δ 為死亡有機物之分解速率；B_F(T) 為地上部生物量；B_H(t) 為收穫生物量；ρ 為折現率。

2.4 考慮傢俱用材碳釋放之模型

至於製成木製傢俱，持續發揮森林碳儲存效益的木材在使用中依然會以μ的速率分解，在經過第一次收穫後可以持續發揮森林碳儲存效益的木材的材積可表示為 $e^{-\mu T} M(T) = e^{-\mu T} (1 - \theta) \times H(T)$ ，而釋放出的二氧化碳則可表示為 $\mu e^{-\mu T} M(T) \pi$ 。傢俱用材碳釋放的碳稅淨現值則表示為：

$$C_{LP}(T, P_C, \mu) = e^{-\rho T} P_C \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \mu e^{-\mu t} M(t) \pi dt \quad (7)$$

C_{LP} 為單位面積傢俱用材碳釋放的碳稅淨現值 (NTD/ha)；P_C 為碳價格 (NTD/tCO₂)；μ 為傢俱用材的分解速率；M(T) 為收穫木材中傢俱用材之材積 (m³/ha)；π 為單位材積所含的碳量 (tCO₂/m³)。

2.5 整體土地期望價值之模型

當所有的收入及碳支出價值皆列入計算時，我們就可以得到單一輪伐期可獲得的利益之淨現值為：

$$W_1 = W_T + W_B - C_D - C_H - C_{SP} - C_{LP} \quad (8)$$

W₁ 為單一輪伐期內單位面積可獲得收益之總淨現值 (NTD/ha)；W_T 為單位面積林木價值的淨現值 (NTD/ha)；W_B 為單位面積地上部碳匯收入的淨現值 (NTD/ha)；C_D 為單位面積土壤死亡有機物之碳稅淨現值 (NTD/ha)；C_H 為單位面積未收穫枝條之碳稅淨現值 (NTD/ha)；C_{SP} 為收穫碳稅之淨現值 (NTD/ha)；C_{LP} 為單位面積傢俱用材碳釋放的碳稅淨現值 (NTD/ha)。

在獲得單一輪伐期內單位面積可獲得的利益之總淨現值後，林地單位面積的無窮期土地期望價值可以透過以下的公式取得

$$W = \frac{W_1}{1 - e^{-\rho T}} \quad (9)$$

藉由將單位面積公頃土地期望價值 (W) 最大化，我們可以得到最適輪伐期 (T)，並且可以再回溯分別計算林地在此最適輪伐期下之單一輪伐期單位面積可獲得的利益之淨現值 (W_1)、單位面積林木價值的淨現值 (W_T)、單位面積地上部碳匯收入的淨現值 (W_B)、土壤死亡有機物之碳稅淨現值 (C_D)、未收穫枝條之碳稅淨現值 (C_H)、單位面積收穫碳稅之淨現值 (C_{SP}) 以及單位面積傢俱用材碳釋放的碳稅淨現值 (C_{LP})。

III、實證結果分析

3.1 研究對象

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 為台灣常綠針葉喬木，又稱福州杉，杉科 (*Taxodiaceae*) 杉木屬 (*Cunninghamia*) 原產於中國大陸西南部各省，於 1917 年引進台灣栽植，現今已成為台灣重要造林樹種之一，造林面積約占 6,216 公頃，其面積為人工針葉林中各樹種中第四名，由於其樹幹通直、生長快速外，其木材軟硬適中且色淡，適於加工，另因具有香氣且耐腐朽，是建築與傢俱等常見的木材之一（王子定、郭寶章，1960；黃凱洛，2003；柳婉郁，2008；曾憲郎、魏惠君，2014；行政院農業委員會林務局，2016）。而國產杉木在 2015 年的總消費量為 14,620.77 立方公尺，占國產材總消費量的 49%，為國產材中消費量最大之樹種，以及其相關研究資料較為完整，故本研究採用此樹種進行模擬分析（行政院農業委員會林務局，2016）。

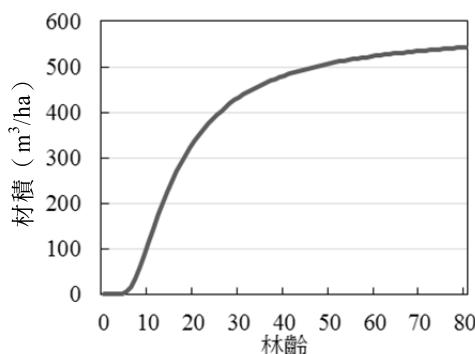
3.2 變數設定與估計

3.2.1 杉木生長模式

本研究就為了要計算杉木經濟林之土地期望價值與最適輪伐期，首先必須要取得杉木之生長收穫模式，而陳麗琴與黃進睦（1992）及劉浚明與鍾旭和（1993）所提出的生長收穫模式均相當具代表性，但由於前者建立模式所使用之樣本均為 8-20 年生之杉木，若以此計算杉木經濟林之土地期望價值與最適輪伐期可能有所偏頗，故本研究參考劉浚明與鍾旭和（1993）所提出的杉木生長收穫模式進行模擬：

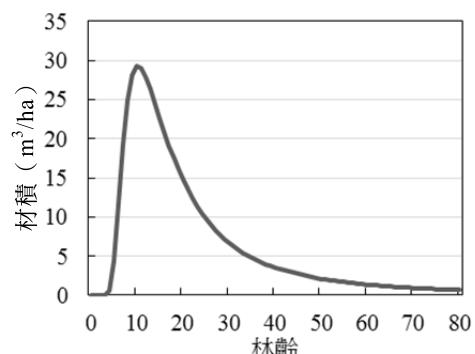
$$V(t) = 578.6851(1-t^{-1.5402})^{54.3344} \quad (10)$$

$V(t)$ 為 t 時之材積 (m^3/ha)； C_{LP} 為林齡。透過杉木之生長收穫模式我們可以取得杉木之材積總生長曲線（圖 1）與杉木之連年生長曲線（圖 2），同時亦可看出杉木的連年生長量在第 10 年時期達到最高，為每年每公頃 29.28 立方公尺；而總平均生長量則是於第 18 年達到最大值，為每年每公頃 17.00 立方公尺。



資料來源：本研究整理。

圖 1 杉木之材積總生長曲線



資料來源：本研究整理。

圖 2 杉木之材積連年生長曲線

3.2.2 杉木碳吸存模式

本研究之杉木碳吸存模式係依照政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 以下簡稱 IPCC) 於 2006 年公布之國家溫室氣體清冊指南 (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 以下簡稱 2006 IPCC 指南) 之計算方式 (Eggleston *et al.*, 2006), 參照馬子斌等 (1992) 所提出的杉木比重, 洪富文、孫正春與黃松根 (1985)、秦建華與姜志林 (1996)、羅天祥與趙士洞 (1997) 所提出的生物量擴展係數 (BEF), 林俊成等 (2002) 所提出的碳含量比例 (CF), 將劉浚明與鍾旭和 (1993) 提出的杉木生長收穫模式換算獲得 (表 1)。

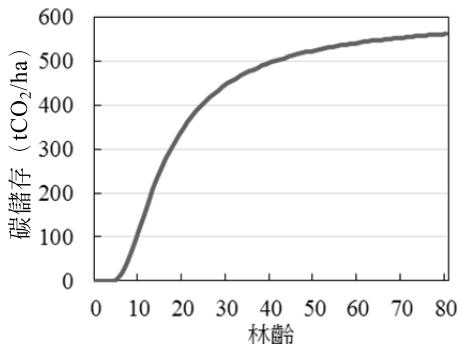
而地上部生物量轉換速率 (γ) 系參照王雪卿、林登秋與王素芬 (2009) 之研究結果, 土壤中死亡有機物分解速率 (δ) 及傢俱用材分解速率 (μ) 系參照周育如與顏江河 (2004) 之研究結果 (表 1)。

透過杉木之碳吸存模式, 我們同樣可以得到杉木之碳儲存曲線 (圖 3) 與杉木之碳吸存曲線 (圖 4), 同時亦可看出杉木在第 10 年時期碳吸存速率達到最高, 為每年每公頃 30.30 噸二氧化碳; 而平均碳吸存速率則是於第 18 年達到最大值, 為每年每公頃 17.59 噸二氧化碳。

表 1 杉木之基本比重、生物量擴展係數及碳含量比例

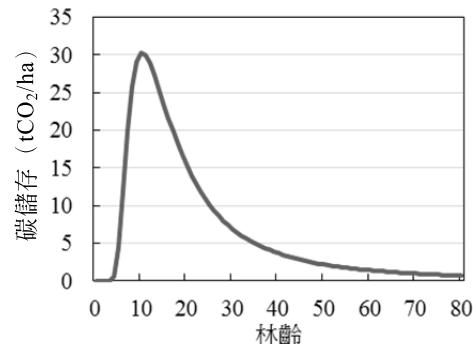
基本比重 (D) (g/cm^3)	生物量擴展係數 (BEF)	碳含量比例 (CF)	地上部生物量 轉換速率 (γ)	土壤中死亡有機物及 傢俱用材分解速率 (δ, μ)
0.35	1.68	0.48	0.0053	0.0265

資料來源：馬子斌等 (1992)、洪富文、孫正春與黃松根 (1985)、秦建華與姜志林 (1996)、羅天祥與趙士洞 (1997)、林俊成等 (2002)、王雪卿、林登秋與王素芬 (2009)、周育如與顏江河 (2004)、本研究整理。



資料來源：本研究整理。

圖 3 杉木之碳儲存曲線



資料來源：本研究整理。

圖 4 杉木之碳吸存曲線

3.2.3 木材價格與碳價格之估計

透過行政院農業委員會林務局木材市價資訊系統，可以取得現今的杉木木材價格，其價格為每立方公尺 5,116 元新台幣（註 1）（行政院農業委員會林務局，2016）。但是由於木材會隨著其形質生長而有不同的價格，因此杉木木材價格並非在所有林齡時皆適用此一價格，而本研究為解決此一問題而參考林國慶與柳婉郁（2007）所建立的杉木木材價格函數：

$$P(t) = 352.11 + 242.75t - 5.284t^2 \quad (11)$$

$P(t)$ 為 t 林齡之杉木木材價格； $P(t)$ 為林齡。藉由此函數所得之杉木木材價格即可考量杉木之形質生長因素，但由於此函數之木材價格於第 23 年後將會開始遞減，並不符合實際情況，故本研究將 23 年後的木材價格維持在 5,116 元，同時因為此函數建立時所使用價格資料與現今價格有所差異，所以本研究將函數原始價格乘以固定比例，使函數最大價格與現今價木材價格 5,116 元相等。

在碳價格的部分由於目前台灣並沒有碳匯市場，亦不存在碳價格，因此本研究則是使用 Wang、Lee 與 Tseng（2001）發表之台灣建議碳價格，為每公噸二氧化碳 1,820 元新台幣，本研究易使用歐盟排放交易機制（European

Union emission trading scheme，以下簡稱 EU ETS）之碳價格進行模擬分析，其碳價格為每公頃二氧化矽 22 元新台幣（註 2）。

3.2.4 造林成本與收穫成本之估計

本研究以杉木進行分析，造林成本根據柳婉郁、盧又銘與林國慶（2009）將其分為育苗、出裁、除草等成本。由於台灣政府對於造林是有進行獎勵的，故若是苗木由林務機關提供，而出裁成本由承包商的承包價格來估算，林主須在第一年支付每公頃 30,000 元進行出裁；除草成本則是以造林後前六年支付，每年每公頃 12,000 元作計算，將以上之成本折現並加總後為每公頃 106,649 元。而年管理費的則是每年每公頃均需支付 450 元。砍伐成本根據曾憲郎與魏惠君（2014）的計算，每公頃約為 321,604 元。

3.2.5 碳釋放比例與折現率

碳釋放比例為收穫的木材中所儲存的二氧化矽有多少比例又再次釋放回大氣，此一定義與徐寬與柳婉郁（2016）所提出的伐材參數之定義正好相反，故本研究將 1 減去其伐材參數得到碳釋放比例為 0.11，表示收穫材積中有 89% 作為傢俱等木製用品，而另外 11% 則是作為薪材使用。而折現率，本研究則是使用現行造林貸款優惠利率 1.25%。

3.3 實證模擬結果與分析

3.3.1 實證模擬結果

本研究以台灣林業現況為基礎，結合不同碳價格進行模擬分析，其結果顯示僅考慮木材收入時林地每公頃之土地期望價值為 4,370,167 元，最適輪伐期為 21 年，而當碳價格為每公頃二氧化矽 22 元時每公頃之土地期望價值將上升 0.15-0.61%，當碳價格為每公頃二氧化矽 1,820 元時將上升 12.02-49.79%，且兩種碳價格皆不足以影響最適輪伐期（表 2）。此模擬結果中有三點是特別值

得我們注意的：第一，國際上現行之碳價格並不足以影響我國杉木之最適輪伐期，但是確實可以提升土地期望價值，而其提升幅度則是取決於碳價格的高低；第二，當碳匯市場考量傢俱用材碳釋放後，土地期望價值會大幅下降，與單純考慮木材收入時之土地期望價值相當接近；第三，純木材收入之最適輪伐期較純地上部碳匯收入長，而造成此情況之原因可能為，純地上部碳匯收入並不需考慮造林與收穫之成本，且碳匯收入之金額以林木之生長速率為計算基準，故其最適輪伐期為能使杉木平均生長速率達到最高之18年，反觀純木材收入之最適輪伐期因需考慮造林與收穫之成本，並且還有林木形質生長的因素，故雖杉木平均生長速率達到最高時為18年，但在綜合以上因素後其最適輪伐期延長至21年。

表 2 不同碳價格下土地期望價值與最適輪伐期

模擬收入情境	碳匯市場之碳價格			
	Wang 等人（2001）臺灣 建議碳價格 1,820 (NTD/tCO ₂)		歐盟排放交易機制 (EU ETS) 22 (NTD/tCO ₂)	
	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)
(1)木材收入	4,370,167	21	4,370,167	21
(2)木材收入+地上部碳匯收入	6,545,936	21	4,396,922	21
(3)木材收入+地上部碳匯收入- 土壤碳釋放支出	5,924,128	21	4,389,276	21
(4)木材收入+地上部碳匯收入- 土壤碳釋放支出-傢俱用材碳 釋放支出	4,895,334	21	4,376,625	21
(5)地上部碳匯收入	2,215,371	18	27,242	18

資料來源：本研究整理。

3.3.2 考慮碳價格變動之敏感度分析

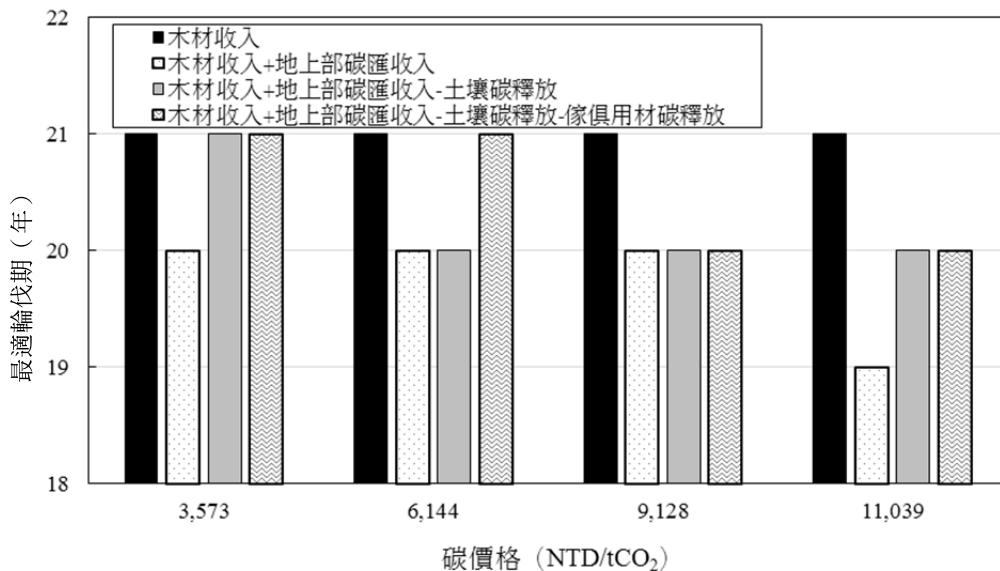
根據土地期望價值與最適輪伐期對碳價格之敏感度分析結果（表 3），我

們可以看出最適輪伐期對碳價格並不敏感，當碳價格到達每公頃二氧化碳4,000元時，考慮木材收入與地上部碳匯收入的情境最適輪伐期僅縮短一年，而當碳價格高達每公頃二氧化碳10,000元時，所有情境之最適輪伐期才皆縮短年。而從圖5最適輪伐期變動之碳價格中，我們可以發現當碳匯市場考慮土壤碳釋放後最適輪伐期對於碳價格的敏感度有一定程度的下降，最適輪伐期縮短的碳價格從每公頃3,573元上升至每公頃6,144元，而當傢俱用材之碳釋放也被列入考慮後最適輪伐期對於碳價格的敏感度則是有相當大的下降，最適輪伐期縮短的碳價格從每公頃3,573元上升至每公頃9,128元，已經相當接近會使最適輪伐期縮短2年的每公頃11,039元，碳匯市場中考慮地上部碳匯收入、土壤碳釋放及傢俱用材之碳釋放者為最適輪伐期最穩定者。

表3 碳價格變動之敏感度分析

碳價格 (NTD/ tCO ₂)	木材收入		木材收入+地上部 碳匯收入		木材收入+地上部碳 匯收入-土壤碳釋放		木材收入+地上部碳 匯收入-土壤碳釋放 -傢俱用材碳釋放	
	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)
22	4,370,167	21	4,396,922	21	4,389,276	21	4,376,625	21
1,000	4,370,167	21	5,565,645	21	5,223,992	21	4,658,721	21
1,820	4,370,167	21	6,545,936	21	5,924,128	21	4,895,334	21
2,000	4,370,167	21	6,761,122	21	6,077,817	21	4,947,274	21
3,000	4,370,167	21	7,956,599	21	6,931,641	21	5,235,827	21
4,000	4,370,167	21	9,156,463	20	7,785,466	21	5,524,381	21
5,000	4,370,167	21	10,362,195	20	8,639,291	21	5,812,934	21
6,000	4,370,167	21	11,567,927	20	9,493,115	21	6,101,487	21
7,000	4,370,167	21	12,773,659	20	10,352,050	20	6,390,041	21
8,000	4,370,167	21	13,979,391	20	11,211,838	20	6,678,594	21
9,000	4,370,167	21	15,185,124	20	12,071,626	20	6,967,147	21
10,000	4,370,167	21	16,390,856	20	12,931,414	20	7,259,202	20

資料來源：本研究整理。



資料來源：本研究整理。

圖 5 最適輪伐期變動之碳價格

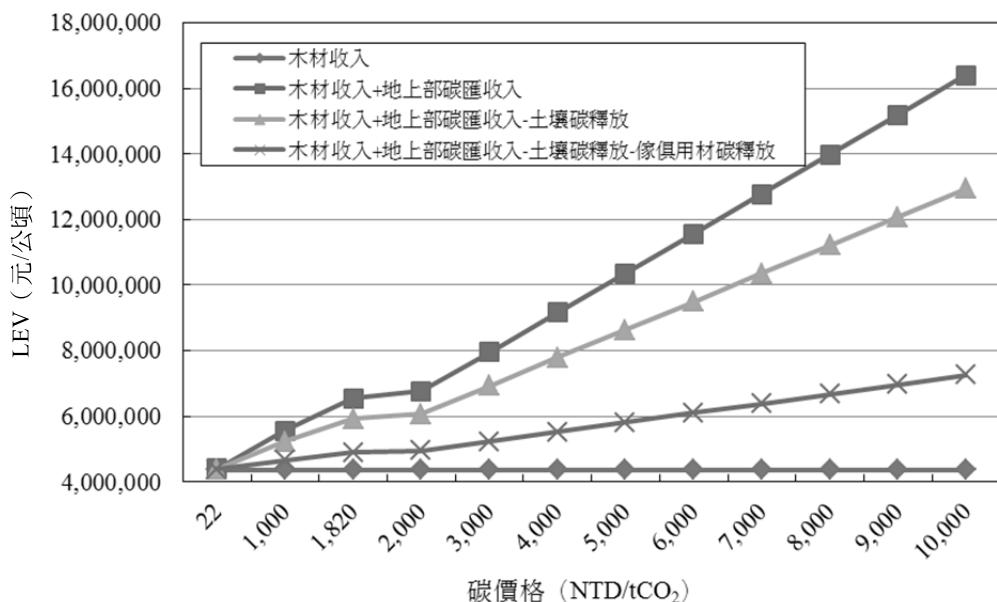
土地期望價值對於碳價格的敏感度則是隨著碳價格越高則越低，例如當碳價格從 0 元上升至 1,000 元時，土地期望價值增加了 6.60-27.36%，而當碳價格從 9,000 元上升至 10,000 元時，土地期望價值僅增加了 6.60-6.68%。其中僅考慮地上部碳匯收入之對於碳價格最為敏感，而考慮地上部碳匯收入、土壤碳釋放及傢俱用材之碳釋放者最穩定（圖 6）。

從以上結果我們可以看出在碳匯市場中所考慮的因素越多，其土地期望價值與最適輪伐期對於碳價格的敏感度也就越低，表示其越為穩定，較不易受到碳價格起伏的風險影響。

3.3.3 考慮碳釋放比例變動之敏感度分析

土地期望價值與最適輪伐期對碳釋放比例之敏感度分析結果如表 4、表 5 所示，碳釋放比例對於最適輪伐期是具備影響力的，但是其影響力會受到碳價格所影響，當碳價格越高，土地期望價值與最適輪伐期對於碳釋放比例

的敏感度也就越高。換句話說，當碳價格越高時，林主越傾向延後對杉木經濟林進行收穫，或是提高收穫木材中傢俱用材的使用比例，減少收穫木材中當作薪材，或是其他無法持續發揮森林碳儲存效益的使用形式所佔的比例。



資料來源：本研究整理。

圖 6 土地期望價值隨碳價格變化之折線圖

土地期望價值則是隨著碳釋放比例越小而上升，而其上升的比例則是越來越低，當碳釋放比例由 0.2 變為 0 時，土地期望價值上升 0.63-4.32%，而當碳釋放比例由 1 變為 0.8 時，土地期望價值僅上升 0.57-5.15%。其中由於考慮傢俱用材碳釋放後就算傢俱用材不須在收穫當下及繳交碳稅，但是仍然須要對其在未來的碳釋放做支付，所以其土地期望價值隨著碳釋放比例下降所上升之比例較小，而另外考慮地上部碳匯收入以及地上部碳匯收入與土壤碳釋放的二種情境，因其收穫中傢俱用材不需繳交碳稅，故其土地期望價值隨著碳釋放比例下降所上升之比例較大（圖 7、圖 8）。

表 4 考慮碳釋放比例變動之敏感度分析－以臺灣建議碳價格為例

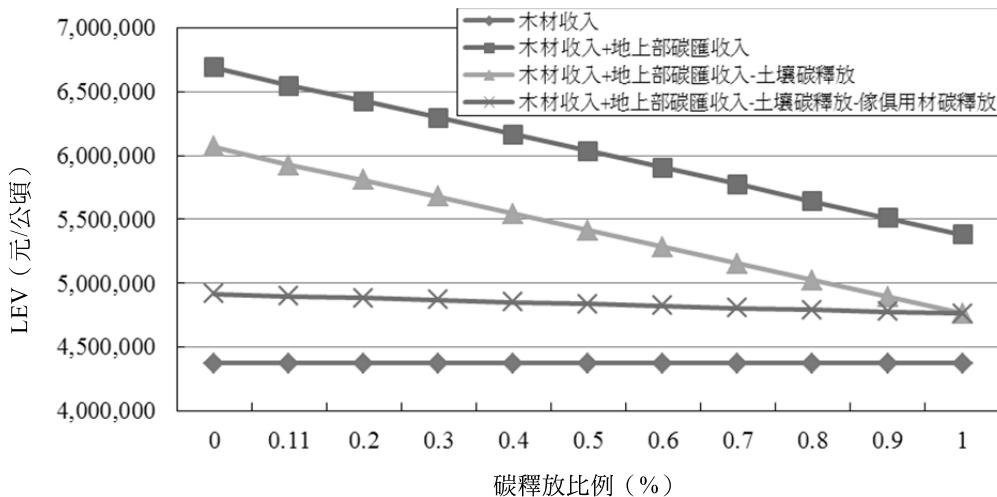
碳釋放 比例	木材收入		木材收入+地上 部碳匯收入		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放- 傢俱用材碳釋放	
	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)
0.00	4,370,167	21	6,690,100	21	6,068,292	21	4,912,343	21
0.11	4,370,167	21	6,545,936	21	5,924,128	21	4,895,334	21
0.20	4,370,167	21	6,427,984	21	5,806,176	21	4,881,418	21
0.30	4,370,167	21	6,296,927	21	5,675,119	21	4,865,955	21
0.40	4,370,167	21	6,165,869	21	5,544,061	21	4,850,492	21
0.50	4,370,167	21	6,034,812	21	5,413,004	21	4,835,030	21
0.60	4,370,167	21	5,903,754	21	5,281,946	21	4,819,567	21
0.70	4,370,167	21	5,772,696	21	5,150,889	21	4,804,104	21
0.80	4,370,167	21	5,641,639	21	5,019,831	21	4,788,912	22
0.90	4,370,167	21	5,510,581	21	4,890,084	22	4,775,146	22
1.00	4,370,167	21	5,379,524	21	4,761,380	22	4,761,380	22

資料來源：本研究整理。

表 5 考慮碳釋放比例變動之敏感度分析－以歐盟排放交易機制為例

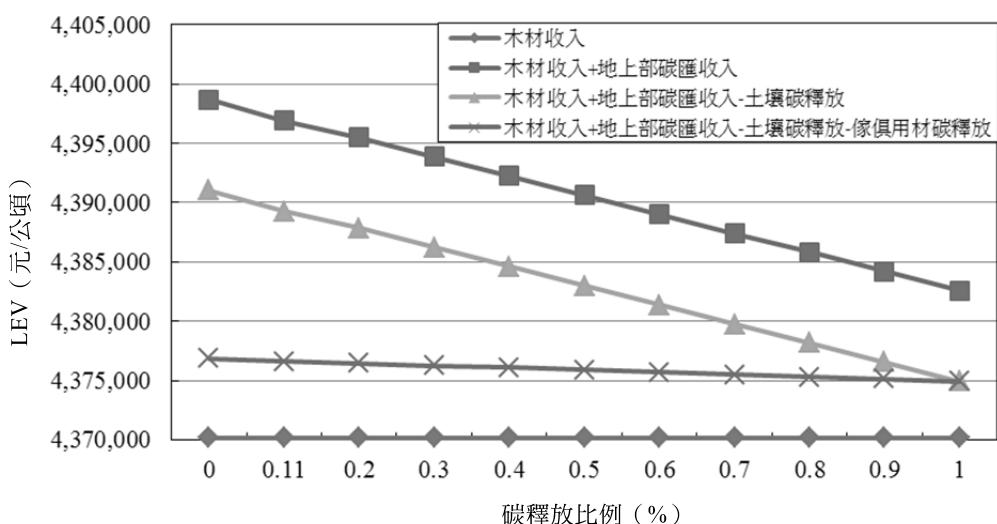
碳釋放 比例	木材收入		木材收入+地上 部碳匯收入		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放- 傢俱用材碳釋放	
	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)
0.00	4,370,167	21	4,398,695	21	4,391,049	21	4,376,834	21
0.11	4,370,167	21	4,396,922	21	4,389,276	21	4,376,625	21
0.20	4,370,167	21	4,395,472	21	4,387,826	21	4,376,454	21
0.30	4,370,167	21	4,393,860	21	4,386,214	21	4,376,264	21
0.40	4,370,167	21	4,392,249	21	4,384,602	21	4,376,074	21
0.50	4,370,167	21	4,390,637	21	4,382,991	21	4,375,884	21
0.60	4,370,167	21	4,389,025	21	4,381,379	21	4,375,694	21
0.70	4,370,167	21	4,387,414	21	4,379,768	21	4,375,503	21
0.80	4,370,167	21	4,385,802	21	4,378,156	21	4,375,313	21
0.90	4,370,167	21	4,384,191	21	4,376,545	21	4,375,123	21
1.00	4,370,167	21	4,382,579	21	4,374,933	21	4,374,933	21

資料來源：本研究整理。



資料來源：本研究整理。

圖 7 土地期望價值隨碳釋放比例變化之折線圖－以臺灣建議碳價格為例



資料來源：本研究整理。

圖 8 土地期望價值隨碳釋放比例變化之折線圖－以歐盟排放交易機制為例

3.3.4 考慮折現率變動之敏感度分析

根據土地期望價值與最適輪伐期對折現率之敏感度分析結果（表 6、表 7、圖 9、圖 10），我們可以看出土地期望價值與最適輪伐期對折現率的敏感程度是很高的，而其敏感度隨著折現率上升而逐漸下降。以台灣建議碳價格之土地期望價值與最適輪伐期為例，僅考慮木材收入時，當折現率由 1% 上升至 2% 後，土地期望價值減少了 56.19%，但當折現率由 9% 上升至 10% 後，土地期望價值僅減少 29.22%。而若是考慮了碳匯市場後，其折現率相同漲幅時土地期望價值的減少比例分別減少為 52.70% 與 21.44%，從此亦可看出碳匯市場是有助於穩地土地期望價值，減少林主在經營林業上的風險。另外，當折現率增高時，土地期期望價值變化趨緩，此符合理論預期，原因在此與土地期望價值之函數型態相關，故呈現當折現率增加時，土地期望價值呈現曲線下降方式並最後趨近於零。

表 6 考慮折現率變動之敏感度分析－以臺灣建議碳價格為例

折現率	木材收入		木材收入+地上部碳匯 收入		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放-傢俱 用材碳釋放	
	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)
1%	5,644,459	22	8,377,134	21	7,525,796	21	6,185,943	21
1.25%	4,370,167	21	6,545,936	21	5,924,128	21	4,895,334	21
2%	2,473,076	21	3,809,451	21	3,506,985	21	2,926,113	21
3%	1,436,823	20	2,311,448	20	2,158,325	20	1,808,970	20
4%	935,132	20	1,574,144	20	1,485,602	20	1,242,404	20
5%	644,329	19	1,142,301	19	1,084,945	19	903,419	19
6%	458,536	19	861,790	19	823,311	19	678,566	19
7%	331,241	18	666,045	19	639,152	19	520,797	18
8%	240,867	18	524,683	18	504,534	18	404,970	18
9%	173,248	18	417,834	18	402,882	18	316,315	17
10%	122,621	17	334,700	18	323,388	18	248,507	17

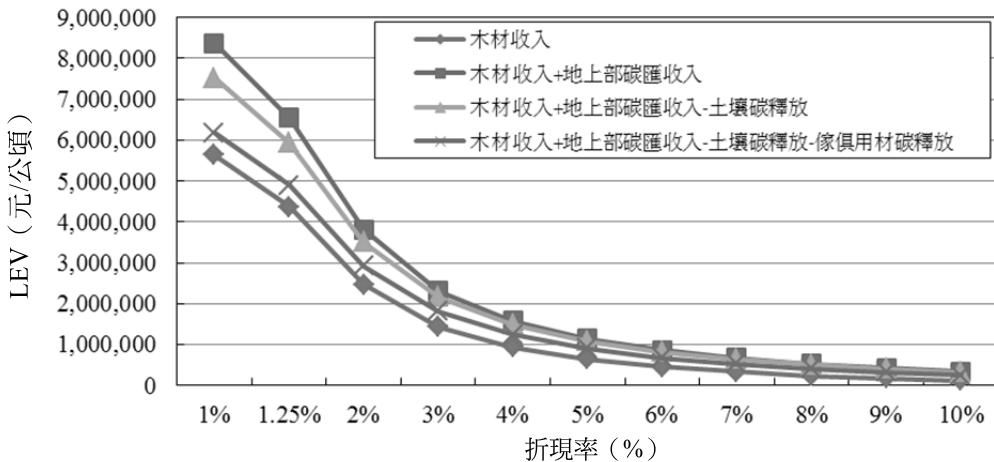
資料來源：本研究整理。

從表 6 土地期望價值與最適輪伐期對折現率之敏感度分析－以臺灣建議碳價格為例中，亦可發現當碳價格到達每公頃 1,820 元時，考慮碳匯市場是可以使最適輪伐期較為穩定的，僅考慮木材收入時，最適輪伐期從 19 年縮短至 18 年只需要折現率上升 2%，但考慮碳匯市場後，最適輪伐期從 19 年縮短至 18 年必需要折現率上升 3%。但是在表 7 土地期望價值與最適輪伐期對折現率之敏感度分析－以歐盟排放交易機制為例中，我們並沒有看到這樣的情況產生，因此推測當碳價格越高時，其穩定土地期望價值與最適輪伐期的能力也就越高，但當碳價格越低時，其穩定土地期望價值與最適輪伐期的能力也就越低，甚至可能會失去效果。

表 7 考慮折現率變動之敏感度分析－以歐盟排放交易機制為例

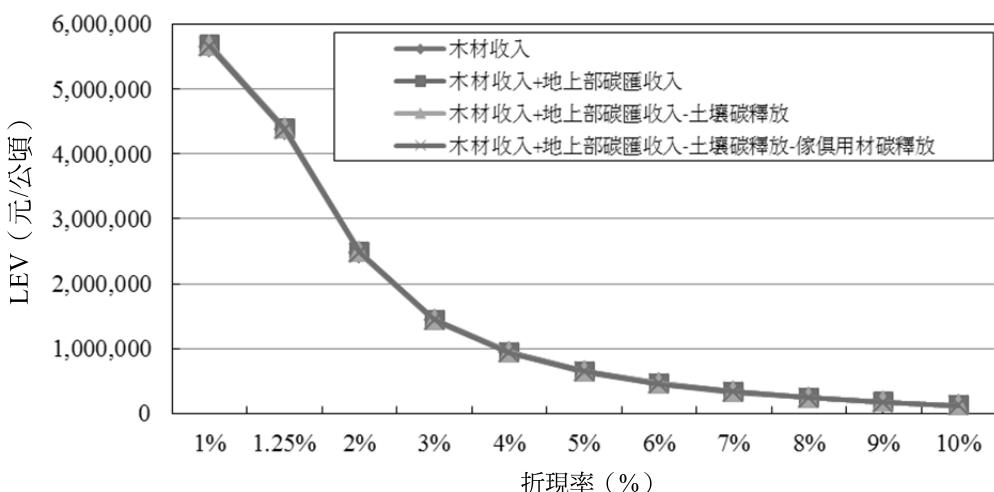
折現率	木材收入		木材收入+地上部碳匯 收入		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放		木材收入+地上部碳匯 收入-土壤碳釋放-傢俱 用材碳釋放	
	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)	LEV (元/公頃)	輪伐期 (年)
1%	5,644,459	22	5,677,732	22	5,667,403	22	5,651,039	22
1.25%	4,370,167	21	4,396,922	21	4,389,276	21	4,376,625	21
2%	2,473,076	21	2,489,509	21	2,485,790	21	2,478,647	21
3%	1,436,823	20	1,447,578	20	1,445,695	20	1,441,399	20
4%	935,132	20	942,990	20	941,901	20	938,910	20
5%	644,329	19	650,453	19	649,748	19	647,515	19
6%	458,536	19	463,495	19	463,022	19	461,242	19
7%	331,241	18	335,353	18	335,011	18	333,572	18
8%	240,867	18	244,357	18	244,110	18	242,885	18
9%	173,248	18	176,256	18	176,072	18	175,007	18
10%	122,621	17	125,222	17	125,076	17	124,169	17

資料來源：本研究整理。



資料來源：本研究整理。

圖 9 土地期望價值隨折現率比例變化之折線圖－以臺灣建議碳價格為例



資料來源：本研究整理。

圖 10 土地期望價值隨折現率比例變化之折線圖－以歐盟排放交易機制為例

IV、結論與建議

4.1 結論

由於我國政府未來要建立合法之碳匯平台，並且近期林務局推行短期經濟造林獎勵政策。而碳匯市場會對我國短期經濟林經營造成什麼影響，未來的碳匯市場又該如何計算森林碳匯？在森林經營管理決策中，牽涉到兩大層面，第一為土地期望價值高低，第二為輪伐期決策，其中，土地期望價值從 Faustmann 模型、Hartman 模型以來已經有許多研究分析，但在實證研究中沒有考慮碳價格、土壤死亡有機物、以及木製品碳釋放比率等不同因素。本研究針對此問題，計算杉木經濟林在不同情境下之碳匯市場在之土地期望價值與最適輪伐期，供未來政府林業部門規劃相關政策參考之用。

在基礎情境下僅考慮木材收入時林地每公頃之土地期望價值為 4,370,167 元，最適輪伐期為 21 年，而當碳價格為每公噸二氧化碳 22 元時每公頃之土地期望價值將上升 0.15-0.61%，當碳價格為每公噸二氧化碳 1,820 元時將上升 12.02-49.79%，且兩種碳價格皆不足以影響最適輪伐期。此模擬結果中顯示國際上現行之碳價格並不足以影響我國杉木之最適輪伐期，但是確實可以提升土地期望價值，而其提升幅度則是取決於碳價格的高低。

從圖 6 至圖 10 可以看出土地期望價值會受到碳價格、碳釋放比例及折現率三者的影響，而其中以折現率之影響最大，碳釋放比例最小，同時三者也都是隨著其數值上升，其影響的程度也逐漸下滑。其次，碳價格與折現率的上升會導致最適輪伐期縮短，當碳價格高達每公噸 3,573 元後，最適輪伐期將開始縮短；碳釋放比例則是對最適輪伐期沒有影響。其中碳價格上升導致最適輪伐期縮短，其情況可能為受到杉木之生長特性與形質生長之影響，由於台灣目前碳釋放比例很低，伐採森林時所需繳交之碳稅很低，並且杉木之

平均生長速率於第18年達到最大，故以18年為輪伐期可使杉木經濟林之碳匯收入最大，但由於木材有形質生長，樹齡越高其木材價值也越高，並且需要考量造林及收穫成本，導致杉木經濟林之木材收入以21年為其最適輪伐期。所以當碳價格越高，最適輪伐期就會越接近18年，但是考量土壤與傢俱用材的碳釋放後，可以使這樣的情況減緩，讓最適輪伐期在碳價格從原本每公頃3,573 時就縮短一年，延長至 9,128 元時才縮短一年。土地期望價值與最適輪伐期牽涉因素甚多，包括森林生長情況、折現率、木材價格、碳匯價格等。當若森林已達輪伐期，欲延長輪伐期之機會成本增高，老齡後林木生產趨緩，故碳匯邊際效益下降，因此碳匯收入減少，故碳價格每公頃 3,573 元時後開始出現縮短情形，亦即林主傾向會提早砍伐重新種植以增加林木生長量進而增加林木碳匯量獲取更高收入。如此意味著，政府進行碳匯給付價格不宜過高，否則將可能使林主獲取更高收益而提早對森林進行砍伐。

其次，以目前台灣的高木材價格與低碳釋放比例的林業現況，僅考慮地上部碳匯收入時土地期望價值雖然可以使土地期望價值大幅上升，吸引較多人加入林業工作，但是卻容易縮短最適輪伐期，且土地期望價值會更容易受到折現率的影響，增加林主在經營林業上的風險。而考量土壤碳釋放後雖然土地期望價值會相較僅考慮地上部碳匯收入時低一些，但亦可使上述容易縮短最適輪伐期與增強土地期望價值受折現率影響的情況得到些微改善。而當所有的碳吸存與碳釋放皆被考慮，即考慮地上部碳匯收入、土壤碳釋放與傢俱用材碳釋放時，雖然土地期望價值上升的幅度相較於前二者小，但依然可以使土地期望價值上升，而特別值得注意的是考慮傢俱用材碳釋放後，大幅改善縮短最適輪伐期與增強土地期望價值受到折現率影響的問題，同時隨著碳價格的上升，越能增加林主將伐材作為傢俱，持續發揮森林碳儲存效益的誘因，甚至能延長最適輪伐期。

4.2 建議

台灣林業的現狀為因生產成本高，故無法與低價之進口木材競爭，政府必須對其進行獎勵才能使林主有誘因投資，然而根據世界貿易組織之規定，各國不能補貼生產，因此獎勵碳匯（非木材生產部分）是各國獎勵林業之趨勢。就台灣而言，碳匯的收入亦可成為增加國產材之競爭力的方法之一。本研究建議政府未來在台灣建立碳匯市場，雖然基礎情境之實證模擬結果中，建立碳匯市場並不足以延長最適輪伐期，以達到增加森林碳匯之目的，但是建立碳匯市場確實可以提升土地期望價值，而相信此結果能吸引更多人士參與林業，增加台灣森林面積，並加強森林經營強度，提升林主投資意願，以達到振興台灣林業經濟與增加台灣森林碳匯之目的。

而碳匯市場中森林碳匯之計算方式建議將地上部碳匯收入、土壤碳釋放與傢俱用材碳釋放皆列入計算，因為此一情境能較正確地反映出森林碳匯的外部效益，同時土地期望價值可以得到提升，並且土地期望價值對於碳價格之敏感度較小，而對於折現率之敏感度並不會過度提升，除了可以提升林主的收入外，亦不會使林主經營林業時的風險過度提高，可以避免林主因未來的不確定性而提早收穫森林。除此之外，在此種情境下最適輪伐期較不易因碳價格上升而縮短，同時亦因最適輪伐期在此情境下對於碳釋放比例之敏感度較高，較能使林主延長最適輪伐期，達到增加森林碳匯之目的，或是增加伐材中傢俱用材之比例，使森林在伐採後依然可以持續發揮森林碳儲存效益。

而最適輪伐期在碳價格從每公頃 3,573 元時開始出現縮短情形，因此未來若是政府欲針對森林的碳儲存效益進行直接給付時，給付價格不宜過高，否則將會導致林主為了讓收益極大而提早對森林進行收穫。本研究礙於資料缺乏與收集不易，在參數設定上受到若干限制，如杉木生長收穫模式引用文獻資料而非實驗調查數據，而生物量擴展係數及碳含量比例等參數亦非現場調查而使用文獻研究數據中針葉樹種之平均數據。因此建議未來研究可以相

關研究較豐富，或資料較完整之樹種進行實證模擬，以降低因參數設定所產生之研究偏誤。另外，本研究可延伸議題包括成立碳匯市場能產生多少誘因，土地期望價值能提升多少則是取決於碳價格的高低，台灣可以增加多少森林面積等是相當重要的研究議題，將有待後續研究進一步延伸與深究。

投稿日期：2017年8月10日

接受日期：2017年12月25日

附註

1. 杉木材價為2017年3月之市場價格。
2. 匯率依照台灣銀行2017年3月23日牌告匯率換算。

參考文獻

- 王子定、郭寶章，1960。『臺灣之經濟樹木』。南投：臺大農學院實驗林管理處。
- 王雪卿、林登秋、王素芬，2009。「台灣中部中低海拔天然林與人工林枯落物量之比較」，發表於中國地理學會年會。彰化：國立臺灣師範大學。4 月 26 日。
- 行政院農業委員會林務局，2016。『林業統計』。台北：行政院農業委員會林務局。
- 行政院環境保護署，2015。『溫室氣體減量及管理法』。取自 <https://goo.gl/BEPMxm>。
- 周育如、顏江河，2004。「惠蓀林場三種林分之枯落物分解速率研究」，『林業研究報告』。26 卷，4 期，61-74。
- 林俊成、鄭美如、劉淑芬、李國忠，2002。「全民造林運動二 oxide 吸存潛力之經濟效益評估」，『臺灣林業科學』。17 卷，3 期，311-321。
- 林俊成、柳婉郁，2010。「考慮機會成本下碳吸存成本效益之經濟分析」，『應用經濟論叢』。88 卷，61-102。
- 林國慶、柳婉郁，2007。「考慮碳吸存價格下最適輪伐期與土地期望價分析」，『農業經濟叢刊』。12 卷，2 期，1-35。
- 林國慶、柳婉郁，2013。「REDD 機制之探討」，『碳經濟』。30 卷，72-106。
- 洪富文、孫正春、黃松根，1985。「蓮華池地區不同林齡杉木林地上部生物量之分佈」。林業試驗所研究報告。第 444 號。
- 柳婉郁，2008。「地主參與碳匯方案與機制之經濟分析」。博士論文，國立臺灣大學農業經濟學研究所。
- 柳婉郁、盧又銘、林國慶，2009。「同時考慮碳價格與木材價格不確定下最適輪伐期之決定」，『農業經濟叢刊』。15 卷，1 期，1-35。
- 徐寬、柳婉郁，2016。「考慮碳價格下森林碳租政策與購碳政策效果之研究」，發表於 105 年森林資源永續發展研討會。屏東：國立屏東科技大學。10 月 27-28 日。
- 馬子斌、陳政靜、熊如珍、黃清吟、陳欣欣、翟思湧，1992。「重要商用木材之一般性質」，『台灣省林業試驗所林業叢刊』。1 卷，1 期，4-5。
- 秦建華、姜志林，1996。「杉木林生物量及其分配的變化規律」，『生態學雜誌』。15 卷，1 期，1-7。

- 陳麗琴、黃進陸，1992。「Weibull 機率密度函數於蓮華池杉木人工林原木經濟價值之研究」，『林業試驗所研究報告季刊』。7 卷，3 期，221-230。
- 黃凱洛，2003。「杉木人工林生長量與碳吸存之研究」。碩士論文，國立中興大學森林學系。
- 劉浚明、鍾旭和，1993。「台灣杉非線性收穫模式之建立」，『中華林學季刊』。26 卷，2 期，39-49。
- 曾憲郎、魏惠君，2014。「考慮碳效益與輻射能量收支下森林最適輪伐期與林地期望值之實證分析」，『農業經濟叢刊』。20 卷，1 期，33-66。
- 羅天祥、趙士洞，1997。「中國杉木林生物生產力格局及其數學模型」，『植物生態學』。21 卷，5 期，403-415。
- Bigsby, H., 2009. "Carbon Banking: Creating Flexibility for Forest Owners," *Forest Ecology and Management*. 257(1): 378-383.
- Core Writing Team, R. K. Pachauri, and A. Reisinger, ed., 2008. *Climate Change 2007 Synthesis Report*. Sweden: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Eggleston, S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, ed., 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan: Intergovernmental Panel on Climate Change. 取自 <http://www.ipcc-nccc.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- Estrada, F., R. S. J. Tol, and C. Gay-García, 2015. "The Persistence of Shocks in GDP and the Estimation of the Potential Economic Costs of Climate Change," *Environmental Modelling & Software*. 69: 155-165.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016. *Global Forest Resources Assessment 2015*. 2nd ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 取自 <http://www.fao.org/3/a-i4793e.pdf>.
- Holtsmark, B., M. Hoel, and K. Holtsmark, 2013. "Optimal Harvest Age Considering Multiple Carbon Pools - A Comment," *Journal of Forest Economics*. 19(1): 87-95.
- Liu, T. M., 2016. "The Influence of Climate Change on Tourism Demand in Taiwan National Parks," *Tourism Management Perspectives*. 20: 269-275.
- Man, C. D., K. C. Lyons, J. D. Nelson, and G. Q. Bull, 2013. "Potential of Alternate Forest Management Practices to Sequester and Store Carbon in Two Forest Estates in British

- Columbia, Canada," *Forest Ecology and Management*. 305: 239-247.
- Manley, B. and P. Maclaren, 2012. "Potential Impact of Carbon Trading on Forest Management in New Zealand," *Forest Policy and Economics*. 24: 35-40.
- Nguyen, T. T. and N. Nghiem, 2016. "Optimal Forest Rotation for Carbon Sequestration and Biodiversity Conservation by Farm Income Levels," *Forest Policy and Economics*. 73: 185-194.
- Strassburg, B. B. N. , A. Kelly, A. Balmford, R. G. Davies, H. K. Gibbs, A. Lovett, L. Miles, C. D. L. Orme, J. Price, R. K. Turner, and A. S. L. Rodrigues, 2010. "Global Congruence of Carbon Storage And Biodiversity in Terrestrial Ecosystems," *Conservation Letters*. 3(2): 98-105.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998. *Kyoto Protocol*. Japan: United Nations Framework Convention on Climate Change. 取自 <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. *Paris Agreement*. France: United Nations Framework Convention on Climate Change. 取自 <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, 2017a. *Status of Ratification of the Kyoto Protocol*. 取自 http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, 2017b. *The Paris Agreement*. 取自 http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php.
- Zhou, W. and L. Gao, 2016. "The Impact of Carbon Trade on the Management of Short-Rotation Forest Plantations," *Forest Policy and Ecology*. 62: 30-35.
- Wang, T. F., P. C. Lee, and C. Y. Tseng, 2001. "The Economic Impact Analysis of Air Pollution Prevention in Taiwan: The Application of a CGE Model," paper presented at 2001 Academic Symposium of Environmental Resource Economics, Management and System Analysis. Taipei. September 21.

Land Expected Value and Optimal Forest Rotation Considering the Carbon Release of Dead Organic Matter and Harvested Wood Products

Kuan Hsu*, Wan-Yu Liu**

Many studies have discussed the impact of carbon trade on land expectation value and optimal rotation age, but CO₂ emissions from harvested forest products are rarely taken into consideration. This study takes the Cunninghamia lanceolata as an example to determine the sensitivity of land expectation value and optimal rotation age to different factors with sensitivity analysis. Land expectation value and the optimal rotation age are estimated for four kinds of situations: (1)Timber value only, (2)Timber value and carbon value of above ground, (3)Timber value and carbon value of above ground and dead organic matter, (4)Timber value and carbon value of above ground, dead organic matter and harvested forest products. The results show that under the Taiwan suggested carbon price the LEV of four kinds of situations are 4,370,167NTD/ha, 6,545,936 NTD/ha, 5,924,128 NTD/ha and 4,895,334 NTD/ha, the carbon trading can make the LEV rise about 12-50%. And the sensitivity analysis show that the LEV is influenced by carbon price, carbon release ratio and discount rate. The optimal rotation age starts to reduce when carbon price is higher than 3,573 NTD. However, the influence is reduced if the timber value and carbon value of above ground are taken into consideration. When the timber value and carbon value of above ground are considered, the land expectation value increases significantly, the optimal rotation age decreases, and the sensitivity of land expectation value to discount rate increases. Considering only carbon value of dead organic matter and harvested forest products suppresses the increase of

* Research Assistant, Department of Forestry in National Chung-Hsing University.

** Corresponding author. Associate Professor, Department of Forestry in National Chung-Hsing University. E-mail: wyliu@nchu.edu.tw.

land expectation value, but significant mitigates the problem that the optimal rotation age reduces and the sensitivity of LEV to discount rate increases. In this situation, the higher the carbon price, the more incentives for forest land owners to keep their harvested forest products in order to keep the carbon in wood, resulting in a longer optimal rotation age. We suggest the government establish a carbon market in Taiwan and the carbon value should include the timber above ground, dead organic matter, and harvested forest products.

Keywords: Carbon Sequestration, Carbon Release, Land Expectation Value, Optimal Rotation Age