

森林碳保存策略之效益評估

柳婉郁 (國中興大學森林學系) (通訊作者, mail: wyliu@nchu.edu.tw)

莊 晴 (國中興大學森林學系)

文章資訊

接受日期：2022.10

關鍵詞：

- 碳保存成本
- 碳保存效益
- 最適輪伐期
- 延長輪伐期

內文摘要 (Abstract)

近年來全球已開始正視溫室氣體持續增加造成地球暖化之問題，全球氣候變遷與暖化的趨勢不可逆，各國之政策重點將轉往調適，包括減少林木砍伐、減少林地變更以及控制森林火災與林木疫情等，各國政府紛紛提出自己的調適策略，此更顯見森林碳保存策略 (conservation strategies) 的重要性。本研究之目的為評估與估算考慮碳價格下，延長輪伐期之碳保存策略 (carbon conservation) 之成本效益。根據本研究結果指出，四種樹種之單位碳保存成本呈現隨著林齡遞減的模式，當輪伐期延長時，其單位之碳保存成本亦逐漸減少，且四種樹種中，肖楠之單位碳保存成本最高，而單位碳保存成本最低者為光臘樹。由同一林齡之單位碳保存成本來看來檢視，以第20年為例，其肖楠之單位碳保存成本為每噸76,716.81元，杉木之單位碳保存成本為每噸13,083.33元，其相思樹之單位碳保存成本為每噸4,815.83元，其光臘樹之單位碳保存成本為每噸3,567.34元。當延長輪伐期一年時，則種植肖楠之私人經濟損失為每公頃52,049.004元，增加碳保存效益為9,353.31元，增加的碳保存成本為每公頃454,246.52元；種植杉木之私人經濟損失為每公頃15,686.178元，增加碳保存效益為5,867.43元，增加的碳保存成本為每公頃40,693.09元；種植相思樹之私人經濟損失為每公頃1,815.61元，增加碳保存效益為8,206.98元，增加碳保存成本為每公頃15,506.73元；種植光臘樹之私人經濟損失為每公頃14,792.31元，增加碳保存效益為6,213.31元，增加碳保存成本為每公頃9,473.09元。本研究之實證結果能適用於未來政府實施與鼓勵延長輪伐期策略上，提供後續相關研究之參考。從結果看來，因目前利率的影響下，對於延長輪伐期與不延長輪伐期來說，影響較不顯著。土地期望價值的結果比較下可發現，考慮折現的土地期望價值，其輪伐期亦不會有明顯的增加。台灣肖楠、杉木、相思樹和光臘樹而言，輪伐期介於18年至30年內。目前我國政府亦有在規劃生態系統服務相關給付政策，而碳保存效益亦為森林生態系統服務的一環，本研究之結果，未來可供政府制定森林碳保存相關政策時參考。

TOWARDS NET ZERO: ASSESSING THE BENEFITS OF FOREST CARBON CONSERVATION STRATEGY

Wan-Yu Liu (Department of Forestry, National Chung Hsing University)

(Corresponding author, mail: wylu@nchu.edu.tw)

Ching Chuang (Department of Forestry, National Chung Hsing University)

Information	Abstract
Accepted date : 2022.10	
Keywords : <ul style="list-style-type: none">• Cost of Carbon Conservation,• Benefit of Carbon Conservation,• Optimal Forest Rotation,• Forest Rotation Extended,	

壹、前言

近年來全球已開始正視溫室氣體持續增加造成地球暖化之問題，1997年公約第三次締約國大會通過的京都議定書（Kyoto Protocol），在2005年2月16日生效。京都議定書明訂各種相關溫室氣體減量之措施及方法，設定第一承諾期間（2008-2012），附件一國家可以採用以增加碳保存方式來抵減該國之碳排放量。根據Watson et al.（2000）之研究，三分之一以上的二氧化碳排放來自於土地利用活動，四分之一的二氧化碳排放來自於森林將吸收的碳釋放至大氣中。因此，在研擬減少大氣中的二氧化碳以及其他溫室氣體（greenhouse gas，GHG）的相關政策措施時，「森林」佔有非常重要的地位，提升森林在碳保存的功能與貢獻成為減少大氣中二氧化碳之重要策略之一（Sampson and Sedjo，1997）。

許多文獻均指出森林具有強大碳保存功能等，就各種抑制二氧化碳排放之工具而言，Adams等（1993）指出造林可以吸取大量的二氧化碳直到科學家發現新的吸碳方式，其他方式如碳稅雖為學者所提議之經濟工具，但涉及政治與所得重分配的問題，且造成實際執行上困難重重，另外許多文獻亦指出森林資源保存大氣二氧化碳所需的調適成本低於產業調整減少二氧化碳排放量之減量成本（楊浩彥，1998）。在京都議定書中規定，1990年以後所種植的森林始可作為該國二氧化碳減量的績效，並鼓勵各國造林。ARD（afforestation，reforestation，deforestation 京都議定書3.3條）減量成本較能源部門減量成本為低，勢必成為未來各國重要的減量權宜措施。根據京都議定書內容的第3.3條與第3.4條之規範，森林產生之碳保存可作為可交易排放單位（tradable emission units），即碳抵減（carbon credits），因此各國均重視採用森林碳保存方式來達成減量規範。

森林所擁有的碳匯（carbon sink）功能是有有效之固碳方法，在實際作法上，國家林業部門透過碳吸存、碳保存及碳替代三種策略，來增加森林碳匯的效益。然而國內針對此三種策略，較多文獻分析碳保存的估算與效益評估，對於碳保存策略與碳替代策略之效益評估甚少涉及，此將無法真正計算出林業部門在碳匯的整體效益。因此本整合型計畫主要分析碳保存（carbon conservation）、碳吸存（carbon sequestration）、碳替代（carbon substitution）三大經營管理策略之綜合效益，而本子計畫之主要研究目的為評估與估算碳保存策略（carbon conservation）之成本效益。

過去數屆公約締約國大會對於造林與再造林機制（afforestation, reforestation, and deforestation，ARD）已有許多討論，顯示各國對於森林減緩氣候變化貢獻之重視，而關於減少因不當伐木與森林退化而排放的溫室氣體政策（reduced emissions from deforestation and forest degradation，REDD）在2005年之蒙特婁會議中首度被提出；而在2007年於印尼峇里島舉行的聯合國氣候變遷綱要公約第13次締約國會議，會議中確認進一步因應氣候變遷的「峇里島路線圖」（Bali Roadmap），有兩個重要結論，一是成立由全球環境基金（global

environmental fund · GEF) 管理的「調適基金」 (adaptation fund) ; 二是重視森林與碳排放的關聯性 · 致力「降低森林消退所導致的碳排放」 (REDD · reducing emissions from deforestation and degradation) 。故各國決議明確提出各國應致力於降低森林消退所導致的碳排放 · 在此次會議中 · 由世界銀行成立森林碳伙伴基金 (Forest Carbon Partnership Facility · FCPF) · 便是為達成REDD機制之目的而設置。REDD 的實施原則是提供財務經濟誘因鼓勵各國保有林地 · 作為碳匯 (carbon sink) 目的而減少砍伐森林。

2009年11月舉行之第13屆世界林業會議 · 及2009年11月在曼谷與巴塞隆納舉行之聯合國氣候變遷綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change · UNFCCC) 下之非正式長期行動合作工作小組 (Ad Hoc Working Group on Long-Term Cooperative Action · AWGLCA) 均提出REDD + 或REDD-plus 。其意涵為減少毀林 (deforestation) 、森林退化 (degradation) 所導致之碳排放 · 並加上森林復育 (forest restoration) 和永續管理 (sustainable management) 的概念 · 亦即 · REDD-Plus為在REDD之原有基礎上 · 又加入森林復育與永續森林管理的概念。其原因為在REDD的概念下 · 過去京都議定書僅考慮造林、再造林與毀林 (afforestation 、 reforestation 、 deforestation · ARD) 所產生淨碳量之計算架構 · 然而 · 近年來考慮土壤碳匯功能、森林永續經營管理、以及森林復育等工作對於碳保存之功能亦逐漸受到重視。而2009年底於哥本哈根舉行的第15次締約國更明確肯定REDD的重要性 · 世界各國將按照REDD的減量目標與架構 · 進行更密切的技術移轉與資金援助 (UNFCCC · 2010 ; IPCC · 2010) 。

2012年 · 在COP18中 · 大會決定將原本京都議定書的規範期限延遲至2020年 · 並在2015年12月於法國巴黎召開COP21 · 完成新的巴黎協定的談判 · 決議各國應該避免全球溫度升溫超過1.5°C · 並在2016年4月在美國紐約公開簽署 · 包含美國、中國、俄羅斯等碳排放大國 · 2016年11月通過巴黎協定。根據協定 · 各國應自願提出國家自主貢獻 (intended national determined contributions, INDCs) · 新的氣候協議亦將對各國之能源政策帶來新的影響 (Griscom et al., 2017; Favero et al., 2017) 。而2016年9月聯合國通過2016年至2030年的永續發展議程 (Agenda 30) · 共計17項 · 其中再生能源是永續目標之一 · 發展生質能將是重點項目 (United Nations, 2016) 。2019年12月COP25在西班牙首都馬德里通過協議。聯合國環境規劃署 (United Nations Environment Programme, UNEP) 在COP25之前發布的排放差距報告 (Emissions Gap Report 2019) 顯示巴黎協定的1.5°C目標已無法達成 · 即使國家自主貢獻全部實現 · 2030年的排放量仍比目標高出38% (UNEP, 2019) · 全球碳預算 (Global Carbon Budget 2019) 亦顯示2019年和2020年化石燃料和工業碳排放將繼續上升 (Peters et al., 2019) 。

由上述可知，全球氣候變遷與暖化的趨勢不可逆，各國之政策重點將轉往調適，包括減少林木砍伐、減少林地變更以及控制森林火災與林木疫情等，各國政府亦應提出自己的調適策略，此更顯見森林碳保存策略 (conservation strategies) 的重要性。就台灣而言，雖然台灣並非締約國成員無法進入COP25，但仍在COP25期間在會場外與瑞典、英國、德國、歐盟等友好國家與友邦進行雙邊會談，亦預計之後會提出溫室氣體減量及管理法的修法方向，擬將使用者付費機制納入考量 (行政院環境保護署環管處，2019)。

本研究之主要研究目的為評估與估算碳保存策略 (carbon conservation) 之成本效益。在碳保存功能上，各國在森林經營策略上大致可以分成下列幾種，包括延長林木輪伐期、增進土壤碳匯管理、與森林火災有效經營，本研究首先研究最適輪伐期之相關文獻與模型，以及碳保存成本與效益評估模式，進一步分析延長輪伐期後，地主之利潤有何減少？碳保存效益有何增加？碳保存成本有何增加？在分析方法上，本研究建構碳保存策略之理論評估模式，進而以情境模擬方式，分析碳保存策略之效益與成本，並嘗試與過去國內外文獻進行比較。此架構期能適用於未來所實施與鼓勵延長輪伐期策略上，提供政府單位進行相關決策之參考

貳、理論模型

一、最適輪伐期模型

輪伐期之決定是森林經營管理策略中被經常探討的課題。最早將木材收益以外價值考慮進最適輪伐期模型之學者為Hartman (1976)，其將林地期望價值與森林景觀價值兩者引入最適輪伐期中，求出最適砍伐的時點。後續有許多學者進行延伸，包括Hoen (1994、1997)、van Kooten et al. (1995)、以及Solberg (1997)等相關研究。在林地期望價值方面，地主除考慮木材收益外，亦考慮碳價格收入來決定最適砍伐時點。理論模型參考自Hoen (1994)與Murray等 (2004)之最適輪伐期模型 (林國慶、柳婉郁，2007)。

(一) 未存在碳價格之最適輪伐期模型

若未存在碳價格市場，加入木材價格隨林齡變化與造林成本隨林齡變化之修正，可推出林主追求林地期望價值最大之最適輪伐期，其模型如下式：

$$\text{Max } LEV = [p(T)Q(T)e^{-rT} - \int_0^T R(t)e^{-rt}] [1 - e^{-rT}]^{-1} \quad (1)$$

其中 LEV 為未考慮碳價格後之林地期望價值， T 為輪伐期長度， $Q(T)$ 為在林齡為 T 年時砍伐時之木材數量， $R(t)$ 為 t 時之造林成本(包括 T 時之砍伐成本)， $p(T)$ 為在林齡為 T 年時之木材

之單位價格， $C(t)$ 為林齡為 t 時之碳保存量， r 為折現率。 $[p(T)Q(T)e^{-rT} - \int_0^T R(t)e^{-rt}]$ 為單一輪伐期下林木砍伐收入之淨現值， $[1 - e^{-rT}]^{-1}$ 則是考慮無窮期下之折現因子。最適輪伐期由(1)式對 T 微分後之一階條件所決定，得下式：

$$p'(T)Q(T) + p(T)Q'(T) = R(T) + r[p(T)Q(T)] + r[LEV] \quad (2)$$

由第(2)式中，在最適輪伐期時，增加一單位輪伐期之邊際利潤將等於增加一單位輪伐期之邊際成本，(2)式之左邊為額外增加一單位輪伐期之邊際利潤，即額外林木成長之木材收入價值，即 $p'(T)Q(T) + p(T)Q'(T)$ ，而第(2)式右邊為額外增加一單位輪伐期之邊際成本，包括延緩砍伐之造林成本、木材收入利息損失與延緩砍伐土地期望價之利息損失。

(二) 存在碳價格之最適輪伐期模型

若考慮存在碳價格市場，加入木材價格隨林齡變化與造林成本隨林齡變化之修正，可推出林主追求林地期望價值最大之最適輪伐期，其模型如下式：

$$\begin{aligned} \text{Max } LEV_c = & [p(T)Q(T)e^{-rT} - \int_0^T R(t)e^{-rt} + \int_0^T vC'(t)e^{-rt} dt \\ & - [vC(T) \int_0^D d(s)e^{-rs} ds]e^{-rT}] [1 - e^{-rT}]^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 LEV_c 為考慮碳價格後之林地期望價值， T 為輪伐期長度， $Q(T)$ 為在林齡為 T 年時砍伐時之木材數量， $R(t)$ 為 t 時之造林成本， $p(T)$ 為在林齡為 T 年時之木材之單位價格(假設隨時間固定)， $C(t)$ 為林齡為 t 時之碳保存量， v 為每單位邊際碳保存之碳價格， r 為折現率， $d(s)$ 為由林木砍伐 s 年後碳釋放量或製成林產品後碳釋放量之函數，而 D 為林木砍伐後碳陸續釋放之總期間。 $vC(T) \int_0^D d(s)e^{-rs} ds$ 為林木砍伐後支付碳釋放價格之淨現值。 $[p(T)Q(T)e^{-rT} - \int_0^T R(t)e^{-rt}]$ 為單一輪伐期下林木砍伐收入之淨現值， $[1 - e^{-rT}]^{-1}$ 則是考慮無窮期下之折現因子。

最適輪伐期由(3)式對 T 微分後之一階條件所決定，得下式：

$$\begin{aligned} p'(T)Q(T) + p(T)Q'(T) + vC'(T)[1 - \int_0^D d(s)e^{-rs} ds] + r[vC(T) \int_0^D d(s)e^{-rs} ds] \\ = R(T) + r[p(T)Q(T)] + r[LEV_c] \end{aligned} \quad (4)$$

由第(4)式中，在最適輪伐期時，增加一單位輪伐期之邊際利潤將等於增加一單位輪伐期之邊際成本，(4)式之左邊為額外增加一單位輪伐期之邊際利潤，其包含三個部分：(1)額外林木成長之木材收入價值，即 $p'(T)Q(T)+p(T)Q'(T)$ ；(2)額外增加碳保存之市場價值，即 $vC'(T)[1-\int_0^D d(s)e^{-rs}ds]$ ；(3)林木砍伐後支付碳釋放價格之利息；即 $r[vC(T)\int_0^D d(s)e^{-rs}ds]$ 。而第(2)式右邊為額外增加一單位輪伐期之邊際成本，包括延緩砍伐之造林成本、木材收入利息損失與延緩砍伐土地期望價之利息損失。

在(2)式與(4)式中可知，當考慮碳價格後，最適輪伐期將會延長，即在(2)式中的 T^* 將比(4)式之 T^* 長，因為一般延長一單位之輪伐期所得之碳保存收入將超過延緩砍伐之土地價值損失以及林木收入之損失之加總（相關實證文獻可參見 van Kooten et al., 1995；Hoen and Solberg, 1997；Murray, 2004 等），因此地主願意接受次佳的木材砍伐時點（suboptimal timber regimes）來提升土地期望價值。由於碳價格之存在，因此地主願意延緩林木輪伐期。碳價格變動將影響林木輪伐期，進而影響碳保存量。

由於我國缺乏杉木伐木後之碳釋放曲線資料與林產品逐年碳釋放資料，且為求符合現況，因此本研究假設碳釋放時（如林產品之釋放或砍伐時之釋放），地主不需支付碳釋放之價格；另外，本研究根據 Murray 等（2004）之模型，除了修正木材價格及造林成本為隨林齡而異，亦考量加入砍伐成本。故裸露林地之地主在面對碳價格與木材價格時，將(1)式之決策模型修正為下式：

$$\text{Max } LEV = [p(T)Q(T)e^{-rT} - \int_0^T Re^{-rt} + \int_0^T vC'(t)e^{-rt}] [1 - e^{-rT}]^{-1} \quad (5)$$

其一階條件式如下：

$$p'(T)Q(T) + p(T)Q'(T) + vC'(T) = R(T) + r[p(T)Q(T)] + r[LEV_{TC}] \quad (6)$$

二、碳保存成本與效益評估模型

（一）碳保存效益評估模型

根據聯合國氣候變化政府間專家委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）估算林業部門碳保存量之原則（IPCC，2003），可將林木材積藉由木材密度換算出林木生物量，再利用林木生物量與地上部、地下部生物量的擴展係數與碳含量等轉換係數，估算出碳保存量。其林木碳保存評估模式如下：

$$C(t) = [Q(t) \times D \times BEF] \times (1+R) \times CF \quad (7)$$

根據上式， $C(t)$ 為在時間為 t 時的林木碳保存量； $Q(t)$ 為林齡 t 年之林木材積（立方公尺/公頃）； D 為基本木材密度（噸/立方公尺）； BEF 為林木生物量換算為地上部生物量的生物量擴展係數； R 為根莖比率； CF 為碳含量比例。而碳與二氧化碳之轉換係數為3.67。

由上述可知，在 T 時砍伐後，單位面積下之代表性樹種碳保存效益之模式如下：

$$S_0 = \int_0^T C'(t) dt - C(T) \int_0^D d(s) ds \quad (8)$$

如(8)式， $C(t)$ 為林齡為 t 時之碳保存量， $d(s)$ 為由林木砍伐 s 年後碳釋放量或製成林產品後碳釋放量之函數，而 D 為林木砍伐後碳陸續釋放之總期間， T 為輪伐期長度。 S_0 代表碳保存量。輪伐期越長，將會延長碳量在生物體之時間，碳保存累積更多，也因此延緩碳釋放至大氣或製成林產品之時間。

但根據過去文獻可知，由於森林減碳效果將提供其他部門提供改善製程之緩衝時間，故部分學者認為相同減碳效果下，現在的減碳效益比未來減碳效益更佳，故應將碳保存效益予以折現，使未來之碳流量等於現在之碳流量是有必要的（Price and Willis, 1993; Fearnside, 1995; Marland et al., 1997），雖然在環境議題中，資源是否需要折現是頗為爭議的，但在動態過程之經濟分析中，折現仍然是必須的。因此將碳保存量加總再予以時間折現後得下式：

$$S_1 = \left[\int_0^T C'(t) e^{-rt} dt - [C(T) \int_0^D d(s) e^{-rs} ds] e^{-rT} \right] [1 - e^{-rT}]^{-1} \quad (9)$$

如(7)式， $C(t)$ 為林齡為 t 時之碳保存量， r 為折現率， $d(s)$ 為由林木砍伐 s 年後碳釋放量或製成林產品後碳釋放量之函數，而 D 為林木砍伐後碳陸續釋放之總期間， T 為輪伐期長度。 S_1 代表經折現後碳保存量之現值。輪伐期越長，將會延長碳量在生物體之時間，碳保存累積更多，也因此延緩碳釋放至大氣或製成林產品之時間。而碳保存量之動態方程式為下式：

$$S_1' = \left[(1 - \int_0^D d(s) ds) C'(T) + r C(T) \int_0^D d(s) ds - r S_0 \right] [e^{rT} - 1]^{-1} \quad (10)$$

(二) 碳保存成本評估模型

早期有關造林碳保存成本方面的研究，大都以造林行為花費的成本多寡來做為碳保存的替代成本，但由前人研究可知，研究區域、規模、生長情形、成本種類、折現率的大小、林木收益等是否列入會影響造林碳保存成本。就私人營林的角度，大部分林主進行造林投資，主要目的是林木生產，而非碳保存，因此就經濟分析的角度，林木碳貯存量算是林木經營以外的一種附帶產出（外部效益）。當林木經營的收益為正，表示所保存的碳量是一種免費的外部效益，反之，如林木經營是利不及費（收益為負），則林木碳保存的產出，就需付出額外的成本（Huang et al., 2004），在估算碳保存成本時，也需考慮木材收益的高低（de Jong et al., 2000）。

本研究假設砍伐林木時，碳保存量將全部釋放，在此前提下，則維持碳保存量的同時，即表示林主亦犧牲林木砍伐之收入，故碳保存成本除造林成本與其他用途之機會成本外，還加上砍伐林木之收入。因此本研究在分析碳保存成本，除考慮初始造林成本與林地經營成本外，亦需考慮林地其他用途收益及林木砍伐收入，本研究將其概念式設定如(11)式¹：

$$CS(T) = CS_i(0) + \int_0^T CS_m(t) e^{-rt} dt + \int_0^T CS_o(t) e^{-rt} dt + (P(T) - H(T))Q(T) e^{-rT} \quad (11)$$

根據(11)式， r 為折現率， $CS(T)$ 為第 T 年之碳保存成本(元/公頃)， $CS_i(0)$ 為第0年時所投入之初始造林成本(元/公頃)， $CS_m(t)$ 為第 t 年之林地經營成本(元/公頃)， $CS_o(t)$ 為第 t 年林地作為其他用途之收益(元/公頃)， $P(T)$ 為第 T 年之林木單位價格(元/立方公尺)， $H(T)$ 為第 T 年之林木伐運費用(元/立方公尺)， $Q(T)$ 為第 T 年之林木材積(立方公尺/公頃)。因此 $\int_0^T CS_m(t) e^{-rt} dt$ 為林地經營成本現值(元/公頃)， $(P(T) - H(T))Q(T) e^{-rT}$ 為第 T 年之木材銷售收入現值(元/公頃)。前人文獻並未將木材收益列入碳保存之成本一部份，因此可能產生低估造林碳保存成本之情形，由(9)式，碳保存的成本除了造林成本之外，尚包含兩部分，包括林地作為其他使用之收入($\int_0^T CS_o(t) e^{-rt} dt$)及林木砍伐收入($(P(T) - H(T))Q(T) e^{-rT}$)。

由(9)式可得第 T 時之平均碳保存成本（元/噸）為下列(12)式：

$$\overline{CS}(T) = \left(CS_i(0) + \int_0^T CS_m(t) e^{-rt} dt + \int_0^T CS_o(t) e^{-rt} dt + (P(T) - H(T))Q(T) e^{-rT} \right) / b(T) \quad (12)$$

¹ 其他如碳保存監測(monitring)、交易(transaction)、驗證(verification)等相關成本，由於在碳交易及清潔發展機制架構下才會發生，因此，本研究未將這些成本列入計算。

若以總碳保存成本極小為目標，則其一階條件為：

$$CS_m(T) + CS_0(T) + [(P'(T) - H'(T)) - r(P(T) - H(T))]Q(T) - [P(T) - H(T)]Q'(T) = 0 \quad (13)$$

若以單位碳保存成本極小為目標，則其一階條件為：

$$\begin{aligned} & [\{CS_m(T) + CS_0(T) + [(P'(T) - H'(T)) - r(P(T) - H(T))]Q(T) - [P(T) - H(T)]Q'(T)\}C(T) - \\ & [CS_i(0) + \int_0^T CS_m(t)e^{-rt} dt + \int_0^T CS_o(t)e^{-rt} dt + (P(T) - H(T))Q(T)e^{-rT}]C'(T)]/C(T)^2 = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

(三) 最適碳保存量模型

根據經濟理論，最適解發生在邊際效益等於邊際成本之時點，以本研究而言，其意涵為碳保存之邊際效益等於碳保存之邊際成本時，此時點滿足碳保存效益最大，且達到最適，令 $\frac{\partial CS(t)}{\partial t} = \frac{\partial C(t)}{\partial t}$ ，可得下式：

$$\begin{aligned} & CS_m(t) + CS_0(t) + [(P'(t) - H'(t)) - r(P(t) - H(t))]Q(t) - [P(t) - H(t)]Q'(t) \\ & = [C'(t)V(t) + C'(t)Q(t)] \cdot D \cdot BEF \cdot (1+R) \cdot CF \end{aligned} \quad (15)$$

滿足上式之 t 即為最適碳保存量時點，此時點之邊際碳保存效益將等於邊際碳保存成本。

III、實證結果分析

一、變數設定

(一) 各樹種成長收穫函數 ($Q(t)$)

為使代表樹種更具代表性，本研究選擇四種樹種，包括兩種針葉樹種—肖楠與杉木，以及兩種闊葉樹種—相思樹與光臘樹。

1. 肖楠

根據洪良斌、羅卓振南 (1980)，可依單株材積生長與株數的關係，算出每公頃的材積，由蓮華池林區肖楠造林木生長之研究中，當每公頃原先栽植株數為2,000株時，47年間，株數隨時間減少，至47年時為876株，依單株材積生長與株數的關係，則每公頃林木

樹齡與立木材積之總生長迴歸式為 $Q(t) = -200.84 + 31.901t - 0.2638t^2$ ，材積生長呈二次曲線增加，在14年以前較慢，14年生以後則加速， $Q(t)$ 為林齡 t 年時的蓄積量（立方公尺/公頃）。

2. 杉木

就台灣種植之杉木人工林而言，根據陳麗琴、黃進睦（1992）所估算出杉木各林齡之原木成長材積，由於僅有8-20年每公頃之材積數據（如表1），故本研究參考劉浚明、鍾旭和（1993）對於杉木人工林生長收穫的研究結果， $Q(t) = 578.6851(1-t^{-1.5402})^{54.3344}$ ，其杉木成長收穫函數為 t 年的函數， $Q(t)$ 為林齡 t 年時的蓄積量（立方公尺/公頃）。

3. 相思樹

根據過去文獻，劉慎孝、林子玉（1968）使用樹幹解析，分析台灣中南部相思樹材積，在林齡4-20年，每公頃的立木材積式為 $1/\log Q(t) = 0.33569364 + 2.20049718/t$ 。可進一步改寫成 $Q(t) = 10^{1/(0.33569364+2.20049718/t)}$ 。 $Q(t)$ 為林齡 t 年時的蓄積量（立方公尺/公頃）。

4. 光臘樹

根據劉宣誠、吳萬益（1984）對光臘樹造林生長與生育地狀況關係研究中。林齡為18年，其立木株數為每公頃1,350株，材積為137.45 立方公尺，林齡為19年時，立木株數為每公頃1,230株，材積為156.33立方公尺，林齡為23年時，立木株數為每公頃1,380株，材積為204.11立方公尺，每公頃林木樹齡與立木材積之總生長迴歸式： $Q(t) = 5.796 - 5.244 t + 1.242 t^2 - 0.0276 t^3$ 。 $Q(t)$ 為林齡 t 年時的蓄積量（立方公尺/公頃）。

（二）木材單位價格函數（ $P(t)$ ）

木材單位價格主要分為上材、中材、下材，無法區分林齡與價格的關係，因此無論林齡多少，單位材積之價格相同，本研究參考行政院農業委員會林務局之單一樹種報表查詢網站來估算木材市價（<http://woodprice.forest.gov.tw/>）。根據行政院農業委員會林務局（2020）之樹種價格查詢網站得知，杉木之2020年4月間平均價格為每立方公尺4,319元，相思樹之2020年4月間平均價格為每立方公尺3,848元，肖楠因2015年之後，數據有缺失，故使用最近的一年2015年之年平均價格為每立方公尺40,654元作為計算，光臘樹之2020年4月間平均價格為每立方公尺3,550元。

(三) 初始造林成本 ($CS_i(0)$) 與林地經營管理成本 ($CS_m(t)$)

造林成本包括初期之投入成本，如整地、苗木、栽植等費用等初始造林成本(initial establishment cost)；第二年起至林木收穫前所付出的成本，如除草、除蔓等撫育成本等林地經營成本(management cost)²。

造林成本根據柳婉郁等 (2009) 將其分為育苗、出栽、除草等成本。由於台灣政府對於造林是有進行獎勵的，若苗木由林務機關提供，而出栽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元進行出栽。

根據行政院農委會林務局 (2011)，每年需進行林地的刈草，以維護林木枝生長。刈草工人工資根據2002年農林字第0910000477號函釋為1,500元/工，一年生造林地年施行刈草2次，每次每公頃林地需要8工；二年生造林地年施行刈草3次，每次每公頃林地需要8工；三年生造林地年施行刈草3次，每次每公頃林地8工；四年生造林地年施行刈草2次，每次每公頃林地9工；五年生施行刈草2次，每次每公頃9工；六年生以後施行刈草1次，每次每公頃10工，故在第六年後，造林地之管理以施行刈草，以每年1次為、每公頃10工之15,000元作為十年生以後之造林地的年管理費用。經過折現之後得到下表1之結果。

表1：各樹種之造林成本折現值

年份	1	2	3	4	5	6
成本(元)						
造林經營成本(元/公頃/年)	59,596.43	41,386.41	41,386.41	29,798.21	29,798.21	16,554.56

資料來源：本研究整理。

伐採成本根據行政院農業委員會林務局2018年林業 (伐木業) 生產成本統計計算。根據統計2018年林木的總計生產數量為5,771.26立方公尺，而2018年總林木伐木造材費為2,609,309元。經過計算之後，將兩者經過計算後，可得到林木平均伐採成本為，每立方公尺452.12元/立方公尺 (行政院農業委員會林務局，2020)。

² 上述成本資料，取自林業試驗所蓮華池研究中心之杉木人工造林地造林台帳，這些造林地分別於1977年至1984年間造林，造林生產成本包括整地、挖穴、栽植、補植、刈草及步道修補、工寮補修、糧食搬運等項目之各年的作業之數與所需成本費用。令各造林年別為該杉木人工造林地造林之第一年，分別計算前六年造林費用。

(四) 折現率 (r)

因為林業投資時間甚長，且其生產過程連續不間斷，故林業之投資受利率影響甚大。因本研究所要探討的為獎勵私有造林，因此參與投資造林者為私人，故其折現率 (discount rate) 以現行造林貸款優惠利率1.04%為基準。

(五) 碳價格 (v)

為將碳保存效益貨幣化，本研究採用減少碳稅之繳交，作為造林達成碳減量之效益。根據《溫室氣體減量管理法》第五章第28條規範中，若溫室氣體排放量超過排放額度者，每公噸之溫室氣體將處以1,500上限之罰鍰。本研究以每公噸碳1,500元作為研究中之碳價格，而根據政府公告，此價格是由中央主管機關會同中央事業主管機關，參考國內外碳市場交易價格定期檢討並公告之 (行政院環境保護署，2015)。根據目前2020年4月22日所公告之各碳交易市場之價格，其結果如下表 2 所示，由於國內有關碳稅稅率的估算差異甚大，且各地區、個國家的碳交易價格都可能會根據當下情況不同而有增減。因此為求嚴謹，本研究將每噸碳價格1,500元，再增減25%，分別為每噸1,125元與1,875元，進行敏感度分析。

表2：2020年各國碳交易系統之價格

交易系統	碳交易價格		
	外幣	台幣(元)	2020.4匯率
歐盟排放交易系統 (European Union Emission Trading System, EU ETS)	21.70 歐元	708.98	1:32.67
紐西蘭排放交易市場 (New Zealand Emissions Trading System, NZ ETS)	24.55 NZUs	440.13	1:17.93
區域溫室氣體倡議 (Regional Greenhouse Gas Initiative, RGGI)	5.65 USD	169.87	1:30.07
加利福尼亞排放限額與交易計畫 (California Cap and Trade Program)	16.68 USD	501.49	1:30.07

資料來源：本研究整理。

(六) 木材密度、擴展係數、根莖比例、碳含量比例

由上述，根據IPCC估算林業部門碳保存量之原則 (IPCC，2003)，可將林木材積藉由木材密度換算出林木生物量，再利用林木生物量與地上部、地下部生物量的擴展係數與碳含量等轉換係數，估算出碳保存量。其林木碳保存評估模式為 $C(t) = [Q(t) \times D \times BEF] \times (1+R) \times CF$ ，根據此式， $C(t)$ 為在時間為 t 時的林木碳保存量； $Q(t)$ 為林齡 t 年之林木材積 (立方公尺/公頃)； D 為基本木材密度 (噸/立方公尺)； BEF 為林木生物量換算為地上部生物量的生物量擴展係數； R 為根莖比率； CF 為碳含量比例。而碳與二氧化碳之轉換係數為3.67。

根據 IPCC (2003) 之作法指南指出生物量擴展係數 (Biomass expansion factors · BEF) ，不同氣候帶與不同的森林類型之生物量擴展係數資料如表3所示，大部分之數字呈現結果大致在1.30左右，故本研究假設以1.3做為後續估算值。

表3：不同氣候帶與不同的森林類型之生物量擴展係數

氣候帶	森林類型	最小胸徑 (公分)	生物量擴展係數
寒帶	針葉樹	0-8.0	1.35 (1.15-3.8)
	闊葉樹	0-8.0	1.30 (1.15-4.2)
溫帶	雲杉	0-12.5	1.30 (1.15-4.2)
	松樹	0-12.5	1.30 (1.15-3.4)
	闊葉樹	0-12.5	1.30 (1.15-4.2)
熱帶	松樹	10.0	1.30 (1.20-4.0)
	闊葉樹	10.0	3.40 (2.00-9.0)

資料來源：IPCC (2003) 。

關於地上部生物量與地下部生物量 (即根莖比率) 部分，如圖1所示，可知地上部生物量與地下部生物量之間呈直線相關的趨勢，即地下部生物量隨著地上部生物量的增加而呈直線的增加，而根據圖2所示，地上部生物量與地下部生物量的比值，主要在於0.20-0.30之間，故本研究假設以0.25做為後續估算值。

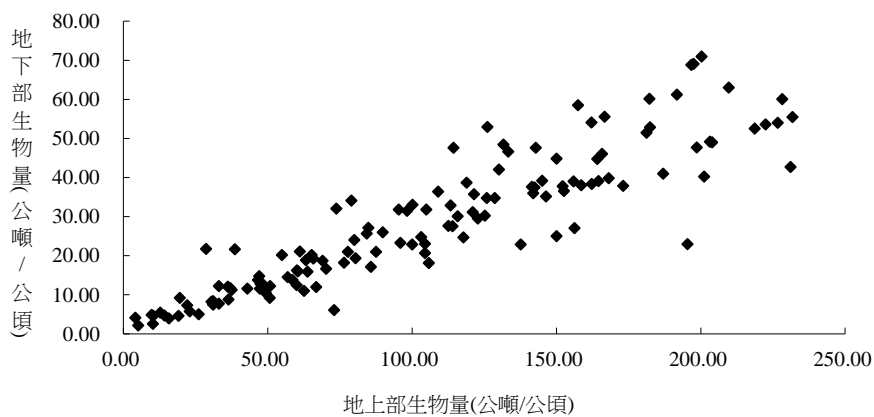


圖1：地上部生物量與地下部生物量之關係

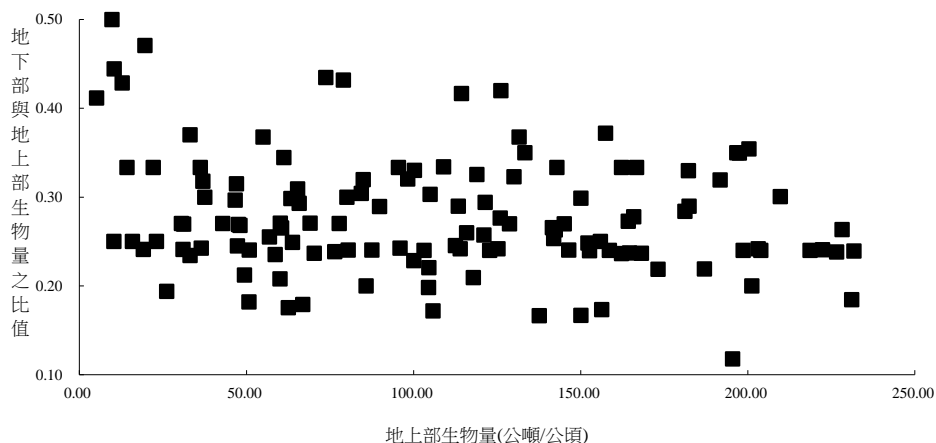


圖2：地下部生物量與地上部生物量之比值

根據上述分析，可得到四種樹種之碳保存函數之各參數估計值，如表4。

表4：四種樹種之碳保存函數參數估計

樹種名稱	肖楠 <i>Calocedrus formosana</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	相思樹 <i>Acacia catechu</i>	光臘樹 <i>Fraxinus formosana</i>
<i>D</i>	0.54	0.31	0.77	0.73
<i>BEF</i>	1.3	1.3	1.3	1.3
<i>R</i>	0.25	0.25	0.25	0.25
<i>CF</i>	0.4857	0.4832	0.4717	0.4683

資料來源：本研究整理。

(七) 碳保存量函數($C(t)$)

由表3，以及碳保存量函數 $C(t) = [Q(t) \times D \times BEF] \times (1+R) \times CF$ ，可得到四種樹種之碳保存函數之估計結果如下：

$$\begin{aligned}
 \text{肖楠：} C(t) &= [-200.84 + 31.901t - 0.2638t^2] \times 0.54 \times 1.3 \times 1.25 \times 0.4857 \\
 &= [-200.84 + 31.901t - 0.2638t^2] \times 0.4262 \\
 &= -85.60 + 13.60t - 0.1124t^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{杉木：} C(t) &= [578.6851(1-t^{-1.5402})^{54.3344}] \times 0.31 \times 1.3 \times 1.25 \times 0.4832 \\
 &= [578.6851(1-t^{-1.5402})^{54.3344}] \times 0.2434 \\
 &= [140.852(1-t^{-1.5402})^{54.3344}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{相思樹：} C(t) &= [10^{1/(0.33569364+2.20049718/t)}] \times 0.77 \times 1.3 \times 1.25 \times 0.4717 \\ &= 0.5902 \times 10^{1/(0.33569364+2.20049718/t)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{光臘樹：} C(t) &= [5.481 - 4.959 t + 1.1745 t^2 - 0.0261 t^3] \times 0.73 \times 1.3 \times 1.25 \times 0.4683 \\ &= [5.481 - 4.959 t + 1.1745 t^2 - 0.0261 t^3] \times 0.56 \\ &= 3.069 - 2.77 t + 0.658 t^2 - 0.0146 t^3 \end{aligned}$$

根據上述之理論模式與變數設定，本研究先計算出未考慮碳價格與考慮碳價格下之輪伐期，其次計算未考慮折現與考慮折現後之碳保存量，進一步推估碳保存效益價值，並分成低效益、中效益、高效益價值進行模擬分析，再者進行碳保存成本之估算，包含總碳保存成本與單位碳保存成本，進一步將本研究所計算出之碳保存成本與效益與國內外文獻進行比較，最後分析延長的輪伐期不同，對於私人利潤損失、碳保存效益與成本等之影響。

二、實證研究結果

(一) 未考慮碳價格之最適輪伐期

根據上述之變數設定與估計，在沒有存在碳價格下，私人追求土地期望價值最大來決定最適輪伐期，假設私人最適輪伐期為 T_1 。其四種樹種之土地期望價值與私人最適輪伐期分析結果如表5與圖3所示。種植肖楠之地主，由於土地期望價值在第24年最高，為56,702,530.68元，故選擇在第24年砍伐並予以販售，亦即肖楠之私人最適輪伐期為24年；其次，對於種植杉木之地主，由於土地期望價值在第18年最高，為3,483,279.25元，故選擇在第18年砍伐販售，亦即杉木之私人最適輪伐期為18年；再者，對於種植相思樹之地主，由於土地期望價值在第30年最高，為565,074.01元，故選擇在第30年砍伐販售，亦即相思樹之私人最適輪伐期為30年；最後，種植光臘樹之地主，其土地期望價值在第23年最高，為236,059.48元，故選擇在第23年砍伐販售，亦即相思樹之私人最適輪伐期為23年。

表5：四種樹種之私人最適輪伐期(T1)與土地期望價值

樹種名稱	肖楠	杉木	相思樹	光臘樹
私人最適輪伐期(年)	24	18	30	23
土地期望價值(元)	56,702,530.68	3,483,279.25	565,074.01	236,059.48

資料來源：本研究整理。

(二) 考慮碳價格之最適輪伐期

根據上一節的變數設定，將相關參數代入(5)與(6)式可求得考慮碳價格下，私人追求土地期望價值最大來決定最適輪伐期，假設私人最適輪伐期為 T_2 。其四種樹種之土地期望價值與最適輪伐期分析結果如表6與圖4所示。種植肖楠之地主，考慮碳價格下之土地期望價值在第24年最高，為57,723,278.97元，故選擇在第24年砍伐並予以販售；其次，對於種植杉木之地主，由於考慮碳價格之土地期望價值在第18年最高，為4,062,174.85元，故選擇在第18年砍伐；再者，對於種植相思樹之地主，由於考慮碳價格之土地期望價值在第30年最高，為1,336,684.45元，亦即相思樹之私人最適輪伐期為30年；最後，種植光臘樹之地主，其考慮碳價格之土地期望價值在第23年最高，為937,644.23元，光臘樹之最適輪伐期為23年。由表5與表4比較可知，考慮碳價格後，其種植肖楠、杉木、相思樹與光臘樹之土地期望價值均提高，但是最適輪伐期不一定延長，由本研究的案例可看出，僅有肖楠、相思樹延長一年，其他樹種仍維持原先的輪伐期。其主要原因在於碳保存量之估算為材積之函數，故考慮碳價格後，其利潤雖然提高，但其逐年之函數分配型態差異不大，故最適輪伐期(即土地期望價值最高的年份)差異亦不大。

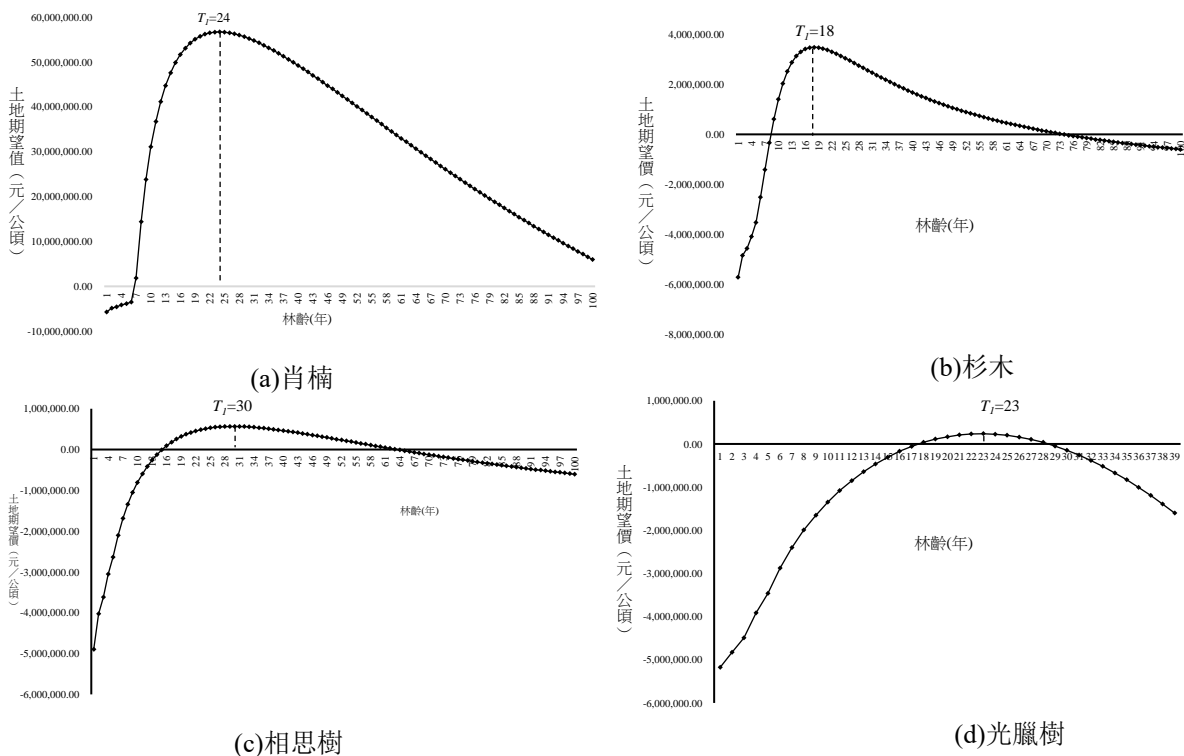


圖3：四種樹種之私人最適輪伐期 (T_I)

表6：四種樹種之社會最適輪伐期(T_2)與土地期望價值

樹種名稱	肖楠	杉木	相思樹	光臘樹
社會最適輪伐期(年)	24	18	30	23
土地期望價值(元)	57,723,278.97	4,062,174.85	1,336,684.45	937,644.23

資料來源：本研究整理。

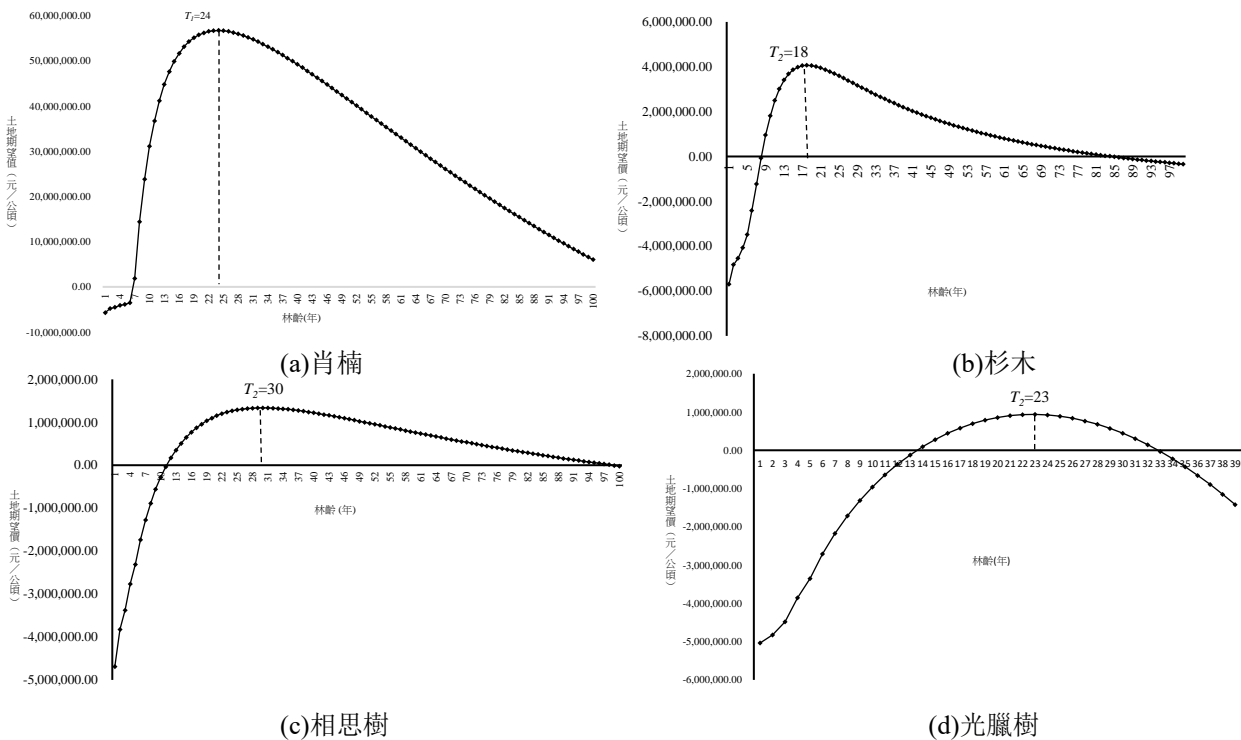


圖4：四種樹種之社會最適輪伐期(T_2)

(三) 碳保存效益之估算

1. 未考慮折現與考慮折現後之碳保存量

雖然在環境議題中，資源是否需要折現是頗為爭議的，但根據過去文獻可知，將碳予以折現使未來之碳流量等於現在之碳流量是有必要的 (Price and Willis, 1993; Fearnside, 1995; Marland et al., 1997)，其原因在於提早的碳保存將比較晚時間的碳保存更能提供其他部門進行減緩氣候變遷策略之緩衝效益。以下針對四種樹種估算沒有折現下與折現後之碳保存量，其結果如表7與圖5。肖楠在最適輪伐期第24年時，其未折現之碳保存量為每公頃175.95噸，經第(9)式折現後之碳保存量為每公頃150.31噸。其次，杉木在最適輪伐期第18年時，其未折現之碳保存量為每公頃74.48噸，經折現後之碳保存量為每公頃65.89噸。再者，

相思樹在最適輪伐期第30年時，其未折現之碳保存量為每公頃164.33噸，經折現後之碳保存量為每公頃137.87。最後，光臘樹在最適輪伐期第23年時，其未折現之碳保存量為每公頃115.58噸，經折現後之碳保存量為每公頃99.50噸。

表7：四種樹種之碳保存量估算

林齡 (年)	肖楠			杉木			相思樹			光臘樹		
	材積 (m ³ /公頃)	未折現碳 保存量 (噸/公頃)	折現後碳 保存量 (噸/公頃)	材積 (m ³ /公頃)	未折現碳 保存量 (噸/公頃)	折現後碳 保存量 (噸/公頃)	材積 (m ³ /公頃)	未折現碳 保存量 (噸/公頃)	折現後碳 保存量 (噸/公頃)	材積 (m ³ /公頃)	未折現碳 保存量 (噸/公頃)	折現後碳 保存量 (噸/公頃)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.48	1.46	1.45	1.77	0.99	0.98
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.97	2.93	2.89	0.06	0.03	0.04
3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	8.62	5.08	4.97	0.50	0.28	0.28
4	0.00	0.00	0.00	0.62	0.15	0.15	13.46	7.94	7.71	2.93	1.64	1.58
5	0.00	0.00	0.00	4.97	1.21	1.15	19.45	11.48	11.07	7.18	4.02	3.84
6	0.00	0.00	0.00	16.56	4.03	3.80	26.52	15.65	14.99	13.08	7.33	6.95
7	9.54	4.07	3.78	35.79	8.71	8.15	34.54	20.39	19.39	20.48	11.47	10.80
8	37.48	15.98	14.74	60.70	14.77	13.73	43.38	25.60	24.20	29.20	16.35	15.30
9	64.90	27.66	25.38	88.81	21.62	19.96	52.91	31.23	29.32	39.08	21.89	20.34
10	91.79	39.12	35.71	118.09	28.74	26.38	63.01	37.19	34.69	49.96	27.98	25.82
11	118.15	50.36	45.73	147.11	35.81	32.68	73.55	43.41	40.24	61.66	34.53	31.67
12	143.98	61.37	55.45	175.01	42.60	38.68	84.44	49.83	45.91	74.02	41.45	37.78
13	169.29	72.15	64.87	201.33	49.00	44.27	95.58	56.41	51.65	86.88	48.66	44.07
14	194.07	82.71	74.00	225.84	54.97	49.43	106.89	63.08	57.42	100.08	56.04	50.46
15	218.32	93.05	82.84	248.49	60.48	54.15	118.30	69.82	63.19	113.44	63.52	56.86
16	242.04	103.16	91.40	269.34	65.56	58.45	129.77	76.59	68.92	126.79	71.00	63.19
17	265.24	113.04	99.69	288.47	70.21	62.35	141.23	83.35	74.58	139.99	78.39	69.38
18	287.91	122.71	107.70	306.00	74.48	65.89	152.64	90.09	80.17	152.85	85.60	75.36
19	310.05	132.14	115.44	322.08	78.39	69.10	163.98	96.78	85.66	165.21	92.52	81.04
20	331.66	141.35	122.92	336.81	81.98	72.01	175.21	103.41	91.05	176.92	99.07	86.36
21	352.75	150.34	130.15	350.33	85.27	74.66	186.32	109.96	96.32	187.79	105.16	91.26
22	373.30	159.10	137.12	362.76	88.30	77.06	197.27	116.43	101.46	197.67	110.70	95.66
23	393.33	167.64	143.84	374.19	91.08	79.25	208.07	122.80	106.48	206.39	115.58	99.50
24	412.84	175.95	150.31	384.73	93.64	81.25	218.69	129.07	111.36	213.79	119.72	102.73
25	431.81	184.04	156.55	394.45	96.01	83.08	229.13	135.23	116.11	219.70	123.03	105.28
26	450.26	191.90	162.55	403.44	98.20	84.75	239.38	141.28	120.73	223.95	125.41	107.10
27	468.18	199.54	168.32	411.77	100.23	86.28	249.44	147.22	125.21	226.38	126.77	108.13
28	485.57	206.95	173.86	419.50	102.11	87.68	259.30	153.04	129.56	226.82	127.02	108.31
29	502.43	214.14	179.17	426.68	103.85	88.97	268.97	158.75	133.78	225.11	126.06	107.60
30	518.77	221.10	184.27	433.36	105.48	90.17	278.44	164.33	137.87	221.08	123.80	105.95
31	534.58	227.84	189.15	439.60	107.00	91.26	287.71	169.81	141.83	214.56	120.15	103.31
32	549.86	234.35	193.82	445.42	108.41	92.28	296.78	175.16	145.67	205.40	115.02	99.63
33	564.61	240.64	198.28	450.86	109.74	93.22	305.66	180.40	149.39	193.42	108.32	94.87
34	578.84	246.70	202.54	455.95	110.98	94.09	314.35	185.53	152.99	178.46	99.94	88.99
35	592.54	252.54	206.60	460.73	112.14	94.90	322.85	190.55	156.48	160.36	89.80	81.94
36	605.71	258.15	210.46	465.22	113.24	95.65	331.16	195.45	159.85	138.94	77.81	73.69
37	618.35	263.54	214.12	469.45	114.26	96.35	339.30	200.25	163.12	114.04	63.86	64.21
38	630.47	268.71	217.60	473.42	115.23	97.00	347.25	204.95	166.28	85.50	47.88	53.44
39	642.06	273.65	220.89	477.17	116.14	97.61	355.03	209.54	169.34	53.16	29.77	41.37
40	653.12	278.36	224.00	480.71	117.01	98.18	362.63	214.03	172.30	16.84	9.43	27.95

資料來源：本研究整理。

2. 碳保存效益價值

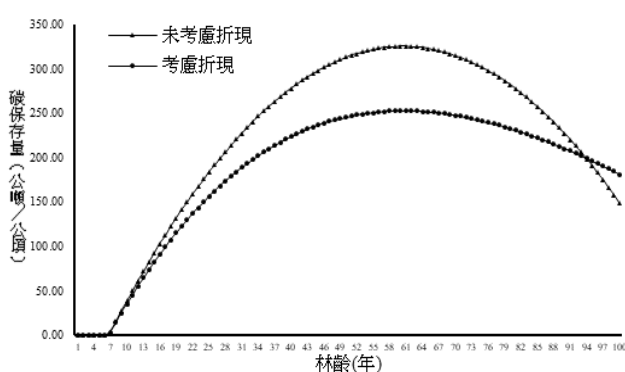
根據前述變數設定，本研究引用溫室氣體排放管法之罰款1,500元之作為碳稅計算，以此作為造林保存碳的一種替代效益，乘上造林每公頃的碳保存量，可得出每公頃碳保存效益價值。由於國內有關碳稅稅率的估算差異甚大，因此為求嚴謹，本研究將每噸碳稅1,500元再增減25%，分別為每噸1,125元與1,875元，進行分析，其結果如表8與圖6，肖楠在最適輪伐期第

20年時，其碳保存效益介於每公頃138,289.54元至230,482.54元之間，其次，杉木在最適輪伐期第20年時，其碳保存效益介於每公頃81,011.33元至135,018.89元之間。再者，相思樹在最適輪伐期第20年時，其碳保存效益介於每公頃102,428.59元至170,714.32元之間。最後，光臘樹在最適輪伐期第20年時，其碳保存效益介於每公頃97,158.45元至161,930.75元之間。

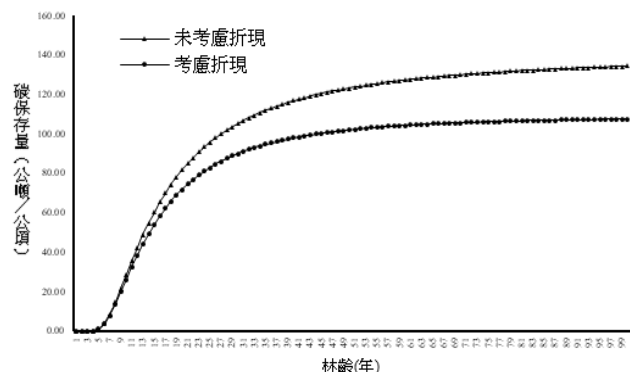
表8：四種樹種之碳保存效益估算

林齡 (年)	肖楠			杉木			相思樹			光臘樹		
	低碳效益 (元/公頃)	中碳效益 (元/公頃)	高碳效益 (元/公頃)	低碳效益 (元/公頃)	中碳效益 (元/公頃)	高碳效益 (元/公頃)	低碳效益 (元/公頃)	中碳效益 (元/公頃)	高碳效益 (元/公頃)	低碳效益 (元/公頃)	中碳效益 (元/公頃)	高碳效益 (元/公頃)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3,249.26	4,332.34	5,415.43	45.45	60.61	75.76
3	0.00	0.00	0.00	2.42	3.23	4.04	5,595.11	7,460.15	9,325.18	315.12	420.16	525.19
4	0.00	0.00	0.00	163.30	217.73	272.16	8,677.75	11,570.33	14,462.92	1,782.91	2,377.22	2,971.52
5	0.00	0.00	0.00	1,293.20	1,724.27	2,155.34	12,458.63	16,611.51	20,764.38	4,324.98	5,766.64	7,208.30
6	0.00	0.00	0.00	4,275.22	5,700.30	7,125.37	16,867.73	22,490.31	28,112.88	7,820.92	10,427.89	13,034.86
7	4,253.38	5,671.17	7,088.97	9,171.08	12,228.11	15,285.13	21,818.80	29,091.73	36,364.66	12,153.71	16,204.94	20,256.18
8	16,582.19	22,109.59	27,636.99	15,447.28	20,596.37	25,745.47	27,220.38	36,293.83	45,367.29	17,209.66	22,946.22	28,682.77
9	28,553.08	38,070.78	47,588.47	22,458.12	29,944.16	37,430.20	32,982.98	43,977.30	54,971.63	22,878.35	30,504.47	38,130.59
10	40,172.14	53,562.85	66,953.56	29,682.58	39,576.77	49,470.96	39,023.31	52,031.08	65,038.85	29,052.53	38,736.71	48,420.89
11	51,445.35	68,593.80	85,742.25	36,770.53	49,027.38	61,284.22	45,266.47	60,355.29	75,444.12	35,628.08	47,504.11	59,380.14
12	62,378.64	83,171.53	103,964.41	43,514.74	58,019.65	72,524.57	51,646.70	68,862.26	86,077.83	42,503.96	56,671.94	70,839.93
13	72,977.84	97,303.78	121,629.73	49,808.68	66,411.57	83,014.47	58,107.36	77,476.49	96,845.61	49,582.09	66,109.46	82,636.82
14	83,248.68	110,998.24	138,747.80	55,610.71	74,147.61	92,684.51	64,600.45	86,133.93	107,667.41	56,767.38	75,689.84	94,612.30
15	93,196.82	124,262.43	155,328.04	60,918.35	81,224.47	101,530.59	71,085.75	94,781.00	118,476.25	63,967.59	85,290.12	106,612.65
16	102,827.85	137,103.80	171,379.75	65,751.32	87,668.43	109,585.54	77,530.04	103,373.39	129,216.73	71,093.30	94,791.07	118,488.84
17	112,147.26	149,529.68	186,912.10	70,140.77	93,521.02	116,901.28	83,906.18	111,874.90	139,843.63	78,057.87	104,077.16	130,096.45
18	121,160.46	161,547.28	201,934.11	74,122.72	98,830.29	123,537.87	90,192.27	120,256.36	150,320.45	84,777.35	113,036.47	141,295.59
19	129,872.80	173,163.74	216,454.67	77,734.26	103,645.68	129,557.10	96,370.94	128,494.58	160,618.23	91,170.45	121,560.59	151,950.74
20	138,289.54	184,386.05	230,482.57	81,011.33	108,015.11	135,018.89	102,428.59	136,571.46	170,714.32	97,158.45	129,544.60	161,930.75
21	146,415.86	195,221.14	244,026.43	83,987.62	111,983.49	139,979.36	108,354.88	144,473.18	180,591.47	102,665.21	136,886.95	171,108.68
22	154,256.86	205,675.82	257,094.77	86,694.02	115,592.03	144,490.04	114,142.14	152,189.52	190,236.90	107,617.04	143,489.39	179,361.74
23	161,817.59	215,756.79	269,695.99	89,158.52	118,878.03	148,597.54	119,784.95	159,713.26	199,641.58	111,942.71	149,256.95	186,571.19
24	169,103.01	225,470.67	281,838.34	91,406.24	121,874.99	152,343.74	125,279.75	167,039.67	208,799.59	115,573.37	154,097.82	192,622.28
25	176,117.99	234,823.98	293,529.98	93,459.61	124,612.81	155,766.02	130,624.55	174,166.07	217,707.58	118,442.47	157,923.30	197,404.12
26	182,867.36	243,823.14	304,778.93	95,338.58	127,118.10	158,897.63	135,818.58	181,091.45	226,364.31	120,485.80	160,647.73	200,809.66
27	189,355.86	252,474.48	315,593.10	97,060.87	129,414.49	161,768.11	140,862.14	187,816.19	234,770.24	121,641.33	162,188.44	202,735.55
28	195,588.17	260,784.22	325,980.28	98,642.21	131,522.95	164,403.69	145,756.35	194,341.80	242,927.25	121,849.25	162,465.67	203,082.09
29	201,568.89	268,758.52	335,948.15	100,096.57	133,462.09	166,827.61	150,502.99	200,670.65	250,838.31	121,051.89	161,402.51	201,753.14
30	207,302.56	276,403.42	345,504.27	101,436.32	135,248.43	169,060.54	155,104.39	206,805.85	258,507.31	119,193.64	158,924.86	198,656.07

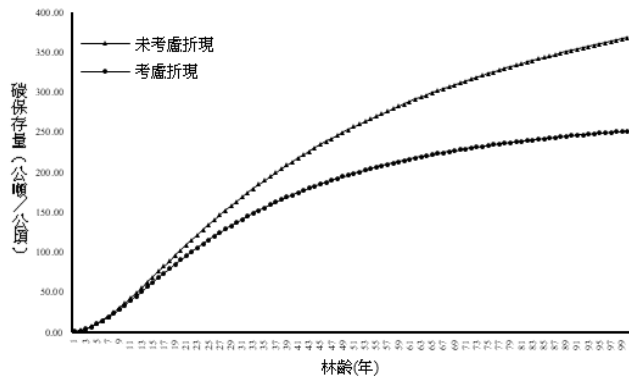
資料來源：本研究整理。



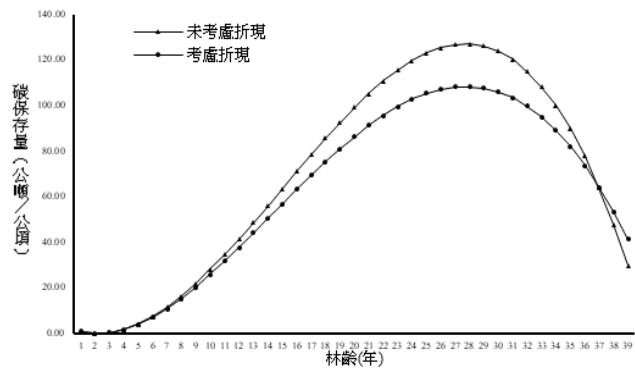
(a)肖楠



(b)杉木

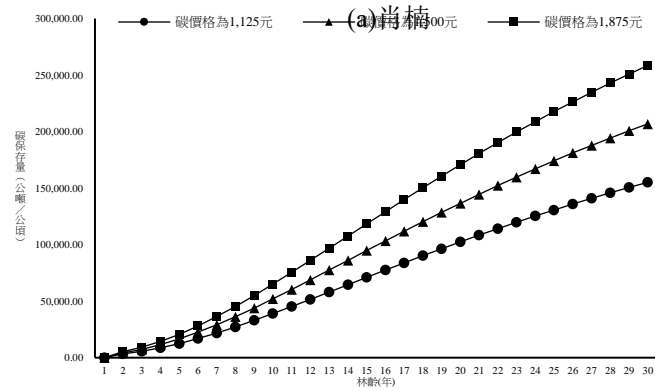
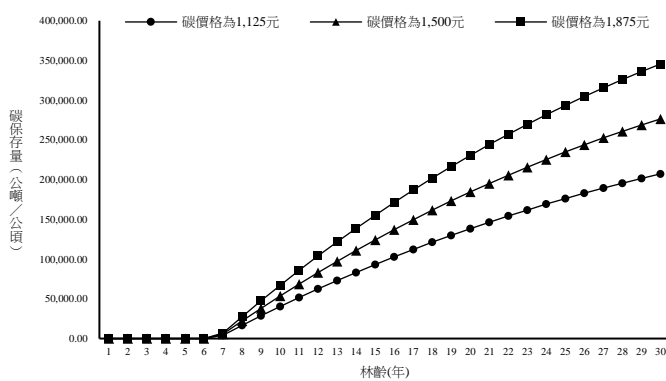


(c)相思樹

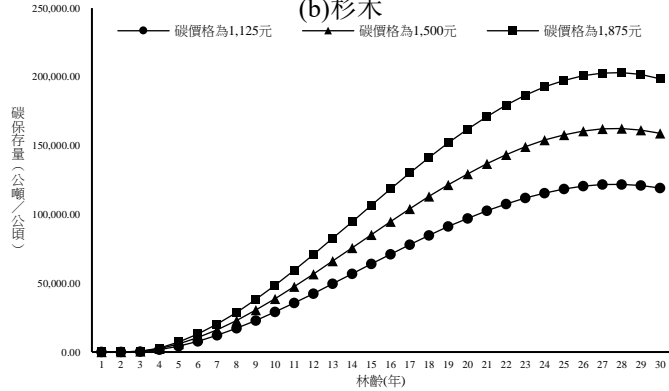
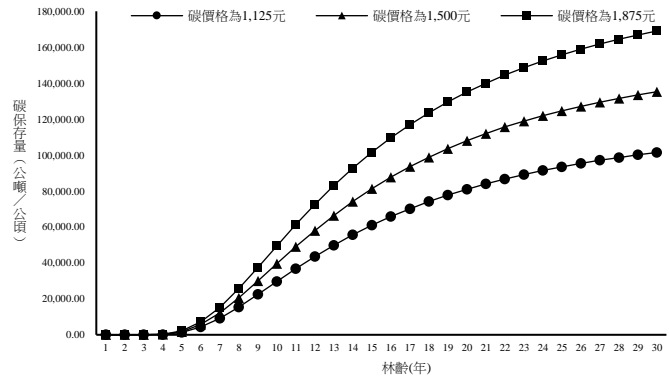


(d)光臘樹

圖5：四種樹種之各年碳保存量



(c)相思樹



(d)光臘樹

圖6：四種樹種之碳保存效益估計值

(四) 極大私人利潤、極大碳保存量、極大邊際碳保存量之最適輪伐期

就計算輪伐期之角度，可分成追求土地期望價值最大之私人最適輪伐期，未折現碳保存量極大之輪伐期、折現後碳保存量極大之輪伐期以及邊際碳保存量極大之輪伐期。其計算結果如表9所示，四種樹種之私人輪伐期介於18年至30年之間，其土地期望價值為每公頃236,059.48元至3,483,279.25元之間；若追求未折現之邊際碳保存量極大，則四種樹種之最適

林齡介於第8年至第16年，且其邊際碳保存量介於每公頃6.77噸至11.91噸；若追求折現後之邊際碳保存量極大，則四種樹種之最適林齡介於第8年至第15年，且其邊際碳保存量介於每公頃5.77噸至10.96噸；若追求未折現之總碳保存量極大，則四種樹種之最適林齡介於第28年至第100年，且其總碳保存量介於每公頃127.02噸至368.68噸；若追求折現後之總碳保存量極大，則四種樹種之最適林齡介於第28年至第100年，且其總碳保存量介於每公頃107.75噸至252.81噸³。

表9：四種樹種之最適輪伐期、邊際碳保存量、總碳保存量之比較

樹種	肖楠	杉木	相思樹	光臘樹
私人最適輪伐期(年)	24	18	30	23
私人最適輪伐期之土地期望價(元/公頃)	56,702,530.68	3,483,279.25	565,074.01	236,059.48
未折現邊際碳保存量極大之林齡(年)	8	10	16	16
未折現邊際碳保存量極大值(噸/公頃)	11.91	7.13	6.77	7.48
折現邊際碳保存量極大之林齡(年)	8	10	14	15
折現邊際碳保存量極大值(噸/公頃)	10.96	6.42	5.77	6.40
未折現碳保存量極大之林齡(年)	60	100	100	28
未折現碳保存量極大值(噸/公頃)	325.42	134.63	368.68	127.02
折現後碳保存量極大之林齡(年)	60	100	100	28
折現碳保存量極大值(噸/公頃)	252.81	107.75	252.19	108.31

資料來源：本研究整理。

(五) 碳保存成本之估算

根據林俊成、柳婉郁(2010)之研究指出，大部分的文獻在計算碳保存成本時，僅考慮初期造林成本與造林經營管理成本，或加入林地做為其他使用之機會成本。然而，林主在砍伐林木時，碳吸保量將釋放，亦即，當林木收益發生的同時，碳保存量亦隨之逸散至大氣中。因此在如此的理論基礎下，維持碳保存量的同時，表示林主亦犧牲林木砍伐之收入，因此，林木收益為維持碳保存量成本之一，此為大多數前人文獻所忽略的。因此，碳保存之機會成本除造林成本與其他用途之收益外，還加上砍伐林木收入之成本⁴。根據前述之第(11)與(12)式，本研究計算出四種樹種之總碳保存成本與單位碳保存成本，其結果如表10所示，以肖楠而言，其私有輪伐期為第24年，當林齡為24年時，碳保存成本為每公頃12,944,876.951元，單位碳保存成本為每噸73,571.187元；以杉木而言，其私有輪伐期為第18

³ 限於材積值必須為正數，故本研究對於四種樹種之模擬期間為一百年以內。

⁴ 本研究設定「碳保存之機會成本」為「土地用於其他用途之租金設算」與「林木砍伐收入」兩項加總折現值，而「碳保存成本」為「造林成本」、「土地用於其他用途之租金設算」與「林木砍伐收入」共三項加總折現值。

年，當林齡為18年時，碳保存成本為每公頃996,322.939元，單位碳保存成本為每噸13,376.795元；就相思樹而言，其私有輪伐期為第30年，當林齡為30年時，碳保存成本為每公頃705,405.018元，單位碳保存成本為每噸4,292.515元；以光臘樹而言，其私有輪伐期為第23年，當林齡為23年時，碳保存成本為每公頃397,266.144元，單位碳保存成本為每噸3,437.154元。四種樹種之單位碳保存成本比較如圖7所示，四種樹種之單位碳吸存成本呈現隨著林齡遞減的模式，初步顯示輪伐期延長，其單位之碳保存成本亦逐漸減少，且四種樹種中，肖楠之單位碳保存成本最高，其次為杉木，第三為光臘樹，而單位碳保存成本最低者為光臘樹。由同一林齡之單位碳保存成本來看來檢視，以第20年為例，其肖楠之單位碳保存成本為每噸76,716.81元，杉木之單位碳保存成本為每噸13,083.33元，其相思樹之單位碳保存成本為每噸4,815.83元，其光臘樹之單位碳保存成本為每噸3,567.34元。

表10：四種樹種之總碳保存成本與單位碳保存成本

林齡	肖楠		杉木		相思樹		光臘樹	
	總碳保存成本 (元/公頃)	單位碳保存成 本(元/噸)	總碳保存成本 (元/公頃)	單位碳保存成 本(元/噸)	總碳保存成本 (元/公頃)	單位碳保存成 本(元/噸)	總碳保存成本 (元/公頃)	單位碳保存成 本(元/噸)
1	60,561.31	60,561.31	60,561.31	60,561.31	120,157.74	82,122.17	64,681.64	64,681.64
2	42,099.57	42,099.57	42,099.57	42,099.57	58,631.59	19,985.99	42,227.00	42,227.00
3	41,664.00	41,664.00	41,698.21	41,698.21	70,022.78	13,770.67	42,798.99	42,798.99
4	30,116.92	30,116.92	32,422.60	32,422.60	73,948.37	9,311.71	36,731.59	22,420.06
5	29,796.78	29,796.78	48,034.85	39,722.31	92,511.94	8,057.40	45,853.57	11,410.45
6	17,054.46	17,054.46	77,215.06	19,157.11	101,670.96	6,495.24	46,024.36	6,282.21
7	373,505.25	91,854.09	145,554.10	16,708.99	125,941.15	6,177.69	61,758.33	5,385.11
8	1,403,357.87	87,841.51	232,678.93	15,749.23	152,264.36	5,946.80	80,035.07	4,894.38
9	2,392,545.29	86,495.60	329,276.71	15,232.08	180,161.66	5,768.99	100,415.12	4,588.16
10	3,341,998.56	85,427.45	427,891.78	14,886.88	209,190.80	5,625.38	122,475.48	4,377.98
11	4,252,631.76	84,451.27	523,558.85	14,621.73	238,956.93	5,504.77	145,809.25	4,222.84
12	5,125,342.26	83,520.44	613,381.87	14,399.11	269,116.13	5,400.23	170,025.18	4,101.64
13	5,961,010.97	82,617.70	695,917.04	14,201.48	299,374.72	5,307.27	194,747.30	4,002.58
14	6,760,502.67	81,735.16	770,651.61	14,019.80	329,486.03	5,222.92	219,614.53	3,918.65
15	7,524,666.18	80,868.66	837,631.44	13,848.99	359,246.02	5,145.13	244,280.30	3,845.47
16	8,254,334.70	80,015.80	897,215.07	13,686.04	388,488.35	5,072.45	268,412.17	3,780.19
17	8,950,326.02	79,175.05	949,918.87	13,529.05	417,079.56	5,003.85	291,691.48	3,720.89
18	9,613,442.77	78,345.41	996,322.94	13,376.79	444,914.46	4,938.58	313,812.99	3,666.24
19	10,244,472.68	77,526.17	1,037,016.03	13,228.42	471,911.92	4,876.05	334,484.54	3,615.28
20	10,844,188.81	76,716.81	1,072,564.86	13,083.33	498,011.17	4,815.83	353,426.67	3,567.34
21	11,413,349.81	75,916.92	1,103,498.26	12,941.09	523,168.52	4,757.60	370,372.35	3,521.90
22	11,952,700.13	75,126.18	1,130,300.42	12,801.40	547,354.51	4,701.08	385,066.58	3,478.60
23	12,462,970.26	74,344.35	1,153,409.23	12,664.01	570,551.49	4,646.08	397,266.14	3,437.15
24	12,944,876.95	73,571.19	1,173,217.61	12,528.74	592,751.53	4,592.41	406,739.23	3,397.36
25	13,399,123.47	72,806.52	1,190,076.42	12,395.43	613,954.65	4,539.96	413,265.17	3,359.07
26	13,826,399.78	72,050.17	1,204,297.99	12,263.97	634,167.34	4,488.60	416,634.11	3,322.18
27	14,227,382.79	71,302.00	1,216,159.90	12,134.26	653,401.31	4,438.25	416,646.73	3,286.63
28	14,602,736.56	70,561.86	1,225,908.69	12,006.23	671,672.41	4,388.83	413,113.95	3,252.42
29	14,953,112.48	69,829.64	1,233,763.32	11,879.80	688,999.76	4,340.27	405,856.67	3,219.57
30	15,279,149.54	69,105.22	1,239,918.34	11,754.91	705,405.02	4,292.52	394,705.44	3,188.18

資料來源：本研究整理。

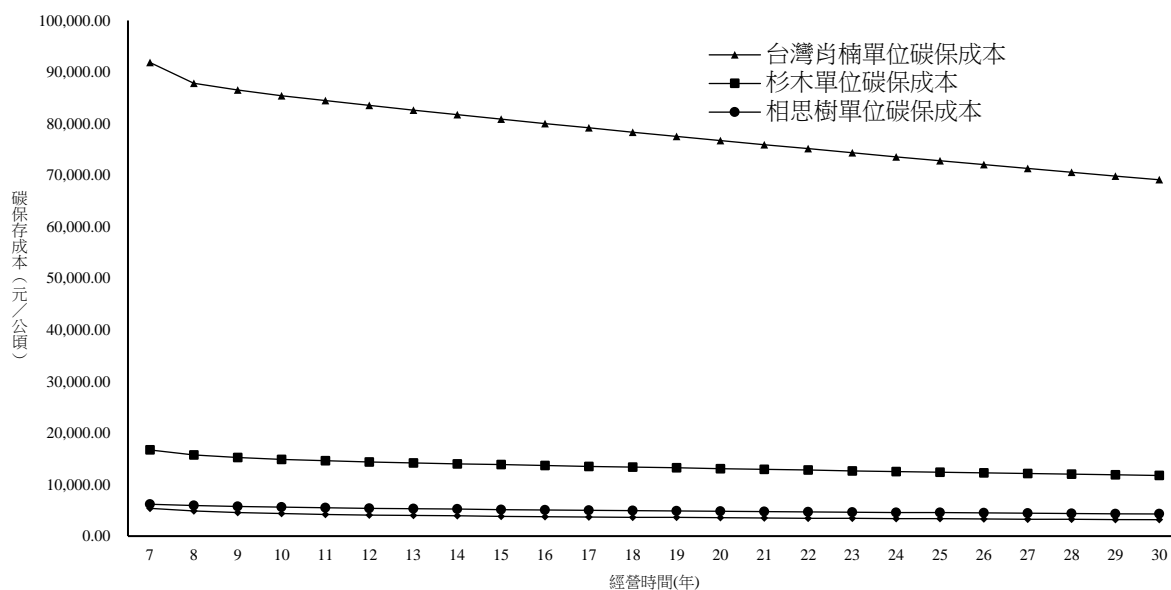


圖7：四種樹種之單位碳保存成本

一般而言，伐木後若將作為木材製品不一定因燃燒而將碳全部釋放，因此碳釋放比率將依據木材用途而有所不同，為求嚴謹，本研究依據Chladná (2007)之設定，將碳吸存釋放率設定在30%、70%與100%三種情況進行敏感度分析，以探討不同碳釋放比率對於碳吸存成本之影響。其敏感度分析結果如表11所示， θ 表示碳釋放比率，當碳釋放比率越高時，則碳吸存成本越高，且隨著林齡增加，則單位碳吸存成本逐漸降低。在樹種為肖楠的設定下，且林齡為10年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸25,920.960元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸59,924.669元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸85,427.450元，其次，林齡為20年生為例，當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸23,088.05元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸53,733.06元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸76,716.81元，林齡為30年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸20,773.63元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸48,391.69元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸69,105.22元。

在樹種為杉木的設定下，且林齡為10年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸4,864.48元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸10,591.56元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸14,886.88元，其次，林齡為20年生為例，當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸4,050.89元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸9,212.28元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸13,083.33元，林齡為30年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸3,614.65元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸8,266.23元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸11,754.91元。

在樹種為相思樹的設定下，且林齡為10年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸1,995.56元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸4,069.74元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸5,625.38元，其次，林齡為20年生為例，當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸1,544.55元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸3,413.85元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸4,815.83元，林齡為30年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸1,344.35元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸3,029.02元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸4,292.52元。

在樹種為光臘樹的設定下，且林齡為10年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸1,722.74元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸3,240.02元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸4,377.98元，其次，林齡為20年生為例，當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸1,174.37元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸2,541.78元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸3,567.34元，林齡為30年生為例，則當碳釋放比率為30%時，碳吸存單位成本為每噸1,031.58元，當碳釋放比率為70%時，碳吸存單位成本為每噸2,263.93元，當碳釋放比率為100%時，碳吸存單位成本為每噸3,188.18元。

表11：考慮不同碳釋放比率之單位碳吸存成本估算

林齡 (年)	肖楠			杉木			相思樹			光臘樹		
	$\theta=30\%$	$\theta=70\%$	$\theta=100\%$	$\theta=30\%$	$\theta=70\%$	$\theta=100\%$	$\theta=30\%$	$\theta=70\%$	$\theta=100\%$	$\theta=30\%$	$\theta=70\%$	$\theta=100\%$
10	25,920.96	59,924.67	85,427.45	4,864.48	10,591.56	14,886.88	1,995.56	4,069.74	5,625.38	1,722.74	3,240.02	4,377.98
15	24,377.44	56,658.14	80,868.66	4,334.44	9,771.32	13,848.99	1,699.24	3,668.32	5,145.13	1,324.78	2,765.17	3,845.47
20	23,088.05	53,733.06	76,716.81	4,050.89	9,212.28	13,083.33	1,544.55	3,413.85	4,815.83	1,174.37	2,541.78	3,567.34
25	21,895.19	50,987.38	72,806.52	3,820.68	8,720.54	12,395.43	1,434.44	3,209.02	4,539.96	1,087.36	2,385.48	3,359.07
30	20,773.63	48,391.69	69,105.22	3,614.65	8,266.23	11,754.91	1,344.35	3,029.02	4,292.52	1,031.58	2,263.93	3,188.18

資料來源：本研究整理。

註：令碳釋放比率為 θ ，因此例如 $\theta=30\%$ ，即表示碳釋放比率為30%。

就前人文獻回顧可知(如表12)，文獻之碳保存成本之差異極大⁵。本研究模擬之四種樹種之單位碳保存成本，以碳釋放比率為100%而言，則本研究計算出來之平均單位碳吸存成本在

⁵ 碳保存成本計算之結果有所差異，原因有很多，包括木材價格不同、樹種選擇不同、碳流量之設定不同、造林成本不同、以及林地其他用途之機會不同等，以碳流量而言，一般估算碳流量共有五種公式，(1) 碳流量曲線(噸/公頃/年)：每年碳保存成長率之軌跡；(2) 平均碳保存流量(噸/公頃/年)：林業政策實施期間之每年碳增量；(3) 累積碳量(噸/公頃)：將一個政策或方案之碳保存加總而沒有考慮時間問題；(4) 平均碳存量(噸/公頃)：一個政策平均而言碳保存之總量；(5) 保留下來的碳量(噸/公頃)：亦即實施此政策可以減少的碳排放總量。不同的估計成本方式，其所需的碳量資料也不同。例如Levelized cost method需要平均碳流量曲線資料(Moulton and Richards, 1990; Dudek and LeBlanc, 1990; Adams et al., 1993; Parks and Hardie, 1995; Callaway and McCarl, 1996; New York State, 1991)；折現法需要碳流量曲線資料

3,188.18元至85,427.450元之間⁶，而若以碳釋放比率為70%為例，則則本研究計算出來之平均單位碳吸存成本在2,263.93元至59,924.669元之間，而若以碳釋放比率為30%為例，則本研究計算出來之平均單位碳吸存成本在1,031.58元至25,920.960元之間，差距頗大，其中肖楠計算出來的單位碳保存成本顯然偏高，而其他三種樹種與國內外文獻上計算之單位碳成本大至相符，沒有明顯偏高⁷。而根據表13所示，國內外文獻關於碳保存效益差異亦頗大，本研究模擬之四種樹種之碳保存效益，包含肖楠、杉木、相思樹與光臘樹之平均碳保存效益分別為每年每公頃7.06噸、4.099噸、5.17噸及4.95噸，與過去文獻之計算結果十分接近。

表12：國內外估算造林碳保存成本之相關文獻

作者	年份	研究區域	碳保存成本(元/噸)
Moulton and Richards	1990	美國	9美元至41美元
Dudek and LeBlanc	1990	美國	23.9美元至38.4美元
van Kooten et al.	1992	加拿大	6美元至18美元
Adams et al.	1993	美國	20美元至61美元
Dixon et al.	1994	美國	4美元至69美元
Xu	1995	中國	低於2美元
Parks and Hardie	1995	美國	5美元至90美元
Callaway and McCarl	1996	美國	10美元至150美元
Alig et al.	1997	美國	24美元至141美元
Richards	1997	美國	10美元至150美元

(Nordhaus · 1991 ; Richards 、 Moulton and Birdsey · 1993 ; Alig et al. · 1997 ; Richards · 1997 ; Adams et al. · 1999 ; Stavins · 1999 ; Newall and Stavins · 2000 ; Plantinga et al · 1999 ; Sedjo · 1999) ; 流量加總法可以使用碳流量曲線資料 (Lewis 、 Turner and Winjum · 1996 ; Plantinga and Mauldin · 2001 ; Plantinga and Wu · 2003) 、平均碳保存流量資料 (van Kooten et al. · 1992 、 2000 ; Wangwacharakul and Bowonwiwat · 1995) 、累積碳量 (Ravindranath and Somashekhar · 1995) 以及保留下來的碳量 (Makundi and Okitingati · 1995) 。另外平均碳存方法需要平均碳存量之資料 (Dixon 、 Schroeder and Winjum · 1991 ; Dixon et al. · 1994 ; Masera et al. · 1995 ; Xu · 1995 ; Wangwacharakul and Bowonwiwat · 1995) 。

⁶ 以2020年4月22日當天之匯率換算，1美元相當於32.67新台幣，故換算可得無考慮碳保存之機會成本下，杉木、相思樹與光臘樹之平均單位碳保存成本介在97.59美元至2,614.86美元之間。

⁷ 就國際碳價格而言，目前世界上的一般交易價格水準為每單位為10至40美元，約為6.33至25.32歐元(新台幣為303.27元至1,213.08元)。根據2007年歐盟氣候交易所(European Climate Exchange · 2007)的交易價格資料，再以1歐元兌換47.91新台幣的匯率換算，可知歐盟氣候交易所2007年之交易價格介於每單位660元到1,320元。另外，再根據過去文獻結果顯示(Den Elzen and de Moor · 2002 ; IETA · 2003 ; Grubb · 2003 ; Olschewski et al. · 2005) · CDM市場交易價格介於每單位10至20美元，而國際上的OECD全球永續發展機構估計歐盟碳排放交易機制(European Union's Emission Trading Scheme · EU-ETS)之價格為每單位10至25美元(Grubb · 2003)。若根據2007年世界銀行之估算，目前已開發國家透過CDM機制購買溫室氣體排放額度的需求量为2億至4億單位，每單位價格在15至20歐元(相當於23.7至31.6美元，最高時甚至高達25歐元(相當於39.5美元)。佔全球碳交易85%以上的歐盟碳交易市場中，2008年的平均單位價格為23歐元左右(相當於36.34美元)。

Sedjo	1999	阿根廷	20美元
Stavins	1999	奈及利亞	0美元至66美元
Stavins	1999	美國	0美元至136美元
Plantinga et al.	1999	美國	0美元至250美元
林俊成等	1999	台灣	新台幣269元
李國忠等	2000	台灣	新台幣448元至2,509元
IPCC	2001	美國	0.1美元至100美元
Sohngen and Mendelsohn	2001	全球	10美元至188美元
Richards and Stokes	2004	美國	10美元至150美元
van Kooten et al.	2004	美國	森林保育：46.62美元至260.29美元 林產品碳貯存及生質能：12.52美元至68.44美元 *若考慮機會成本：116.76美元至1,406.60美元
林國慶等	2007	台灣	台糖公司：新台幣511.61元 私有農民：新台幣1,597.82元
林俊成、柳婉郁	2010	台灣	新台幣288.01元至1,028.982元
行政院農業委員會水利署	2017	台灣	新台幣58.806元
Van Kooten et al.	2019	美國	38.5美元至120.7美元
Lin et al.	2020	台灣	約新台幣129.93元

資料來源：本研究整理。

表13：國內外估算造林碳保存效益之相關文獻

作者	年份	研究區域	碳保存效益
Sedjo and Solomon	1989	全球	6.24 噸/公頃/年
Nordhaus	1991	全球	0.8-1.6 噸/公頃/年
Dixon, Schroeder and Winjum	1991	北極	0.75-2噸/公頃/年
	1991	溫帶	1.5-8.75噸/公頃/年
	1991	熱帶	1.25-6.25噸/公頃/年
Houghton et al.	1993	拉丁美洲	1.5-3.05噸/公頃/年
	1993	非洲	1.45-3.9噸/公頃/年
	1993	亞洲	1.7-3.35噸/公頃/年
Moulton and Richards	1990	美國	2.0-10.9 噸/公頃/年
Dudek and LeBlanc	1990	美國	3.7-8.9噸/公頃/年
Adams et al.	1993	美國	2.0-10.9 噸/公頃/年
Parks and hardie	1995	美國	3.3-5.1 噸/公頃/年
Richards	1997	美國	0.9-9.4 噸/公頃/年
胡大維	1998	美國	6.24噸/公頃/年
Newell and Stavins	1999	Delta States	2.05噸/公頃/年
林俊成等	1999	台灣	29.55噸/公頃/年
林俊成等	1999	台灣	8.05噸/公頃/年

	1999	緬因州	1-1.15噸/公頃/年
Plantinga	1999	美國	1.1-1.3噸/公頃/年
	1999	美國	0.78-0.82噸/公頃/年
van Kooten et al.	1992	加拿大	0.6-0.8 噸/公頃/年
Slangen and van Kooten	1996	荷蘭	1.4-2.3 噸/公頃/年
Masera et al.	1995	墨西哥	1.25-7.5噸/公頃/年
Ravindranath and Somashekhar	1995	印度	3.8-6.05噸/公頃/年
Xu	1995	台灣	1.1-7.3噸/公頃/年
Barson and Gifford	1995	台灣	2.21-18.75 噸/公頃/年
	1990	澳洲	7.5 噸/公頃/年
Tasman Institute	1994	紐西蘭	7.7 噸/公頃/年
Sedjo	1999	阿根廷	12.05噸/公頃/年
de Jong et al.	2000	墨西哥	2.28-3.73噸/公頃/年
van Kooten et al.	2000	英國	5.35-7.95噸/公頃/年
林俊成等	2002	台灣	5.62-19噸/公頃/年
Pfaff et al.	2008	哥斯大黎加	4.7-12.95噸/公頃/年
Van Kooten et al.	2019	美國	3.15-7.46噸/公頃/年
Tang and Zhang	2018	中國	2.78 噸/公頃/年

資料來源：本研究整理。

(六) 延長輪伐期之私人經濟損失、增加的碳保存效益與成本

進一步本研究計算私有地主延長私人利潤極大之輪伐期，其私人經濟損失、增加的碳保存效益以及增加的碳保存成本比較，其結果如圖8、圖9、圖10與表14。隨著輪伐期延長期間拉長，其四種樹種的利潤損失的幅度越多，其中以種植肖楠之私人經濟損失最大，主要是因為肖楠之立木價值比起其他三種樹種的價值來得高；然而隨著輪伐期延長期間拉長，其碳保存效益亦隨之增加，其中以肖楠之碳保存效益增加的幅度最大，而光臘樹延長輪伐期而增加的碳保存效益較少，甚至在輪伐期延長五年後，碳保存效益增加的幅度越來越少。以私人輪伐期延長1年為例，亦即種植肖楠之地主由輪伐期24年延長至25年，則其私人之經濟損失為每公頃52,049.004元，增加之碳保存量為每公頃8.09噸，增加的碳保存成本為每公頃454,246.52元；種植杉木之地主由輪伐期18年延長至19年，則其私人之經濟損失為每公頃15,686.178元，增加之碳保存量為每公頃3.91噸，增加的碳保存成本為每公頃40,693.09元；種植相思樹之地主由輪伐期30年延長至31年，則其私人之經濟損失為每公頃1,815.61元，增加之碳保存量為每公頃5.47噸，增加的碳保存成本為每公頃15,506.73元；種植光臘樹之地主由輪伐期23年延長至24年，則其私人之經濟損失為每公頃14,792.31元，增加之碳保存量為每公頃4.14噸，增加的碳保存成本為每公頃9,473.088元。而當延長私人輪伐期5年時，則種植肖楠之地主由輪伐期

24年延長至29年，則其私人之經濟損失為每公頃1,071,588.279元，增加之碳保存量為每公頃38.19噸，增加的碳保存成本為每公頃2,008,235.53元；種植杉木之地主由輪伐期18年延長至23年，則其私人之經濟損失為每公頃283,945.616元，增加之碳保存量為每公頃16.60噸，增加的碳保存成本為每公頃157,086.29元；種植相思樹之地主由輪伐期30年延長至35年，則其私人之經濟損失為每公頃35,536.20元，增加之碳保存量為每公頃26.21噸，增加的碳保存成本為每公頃69,060.42元；種植光臘樹之地主由輪伐期23年延長至28年，則其私人之經濟損失為每公頃274,220.00元，增加之碳保存量為每公頃11.44噸，增加的碳保存成本為每公頃15,847.81元。

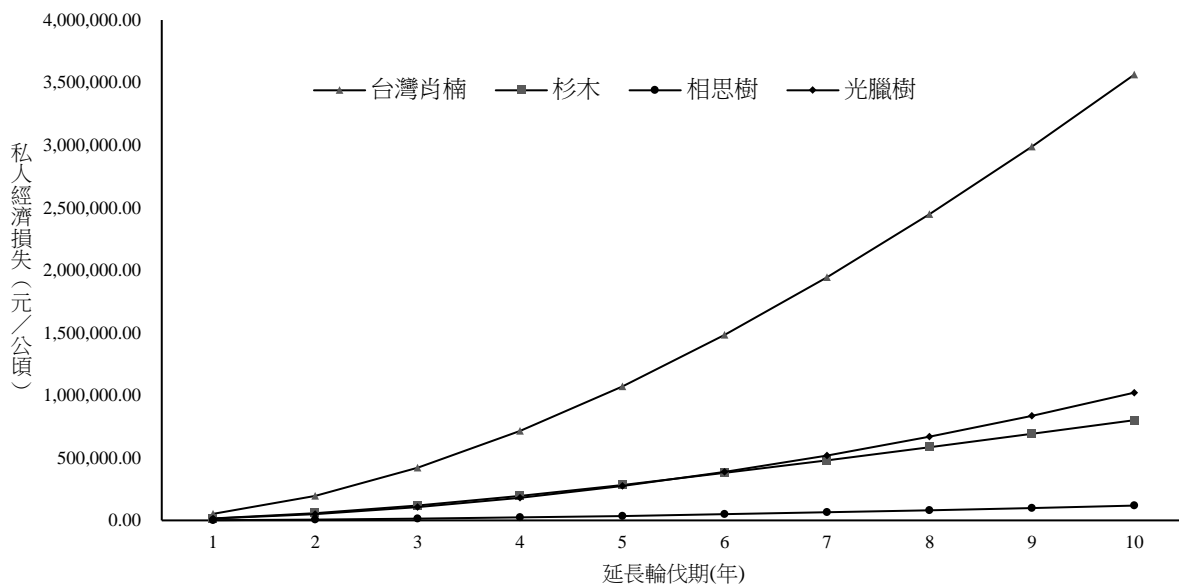


圖8：四種樹種延長輪伐期之私人經濟損失現值

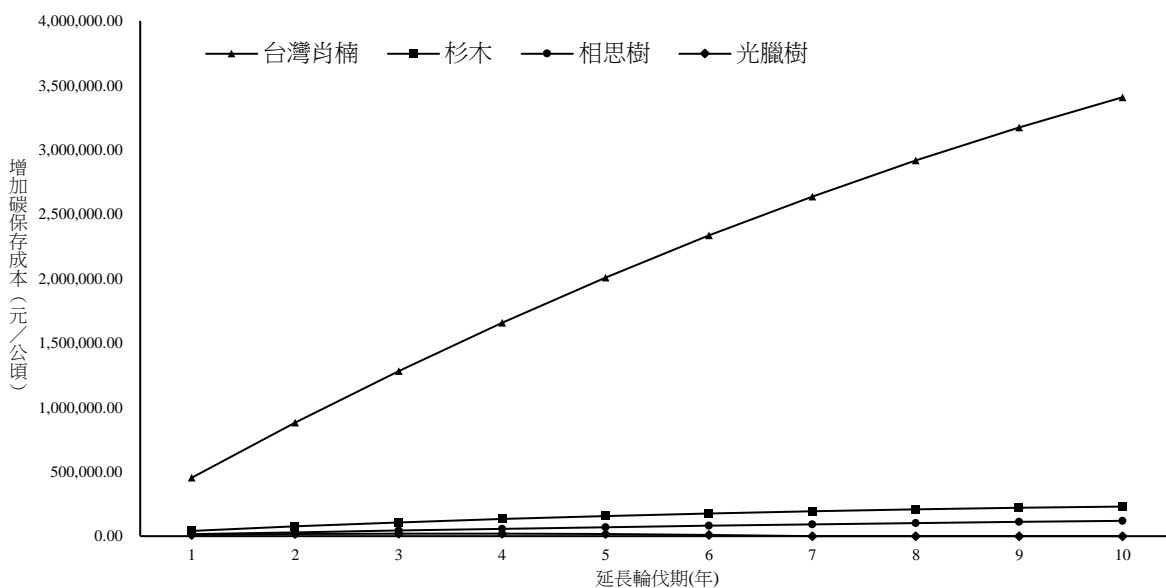


圖9：四種樹種延長輪伐期而增加的碳保存成本

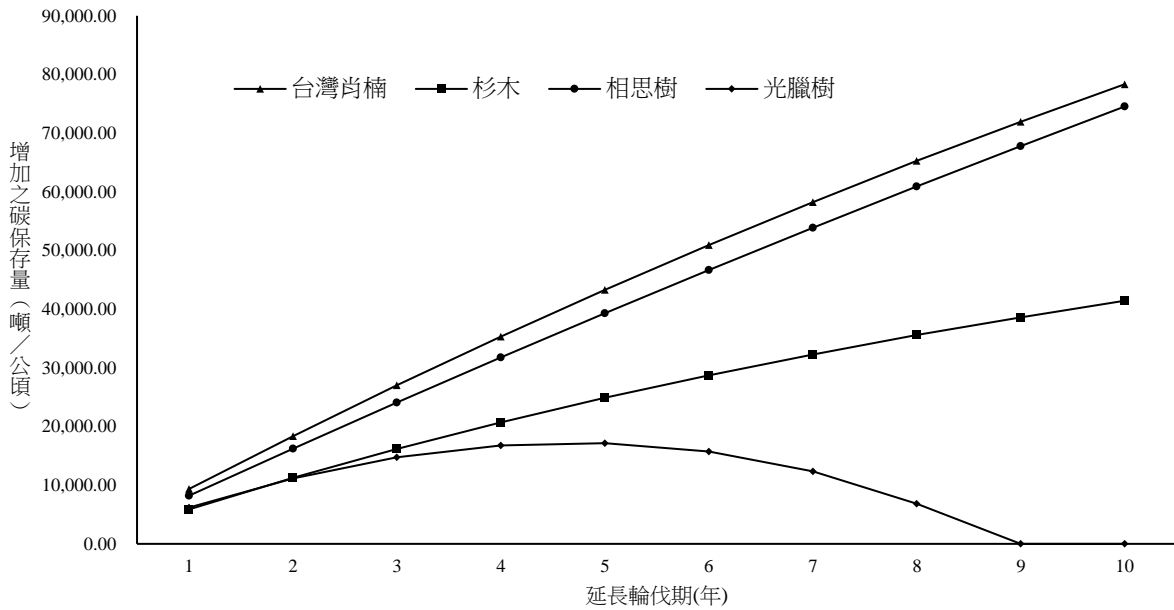


圖10：四種樹種延長輪伐期之增加的碳保存效益

表14：延長輪伐期之私人經濟損失、碳保存效益與碳保存成本

項目	肖楠	杉木	相思樹	光臘樹
私人之經濟損失(元/公頃)	52,049.004	15,686.178	1,815.61	14,792.31
增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	8.09	3.91	5.704	4.14
延長1年 增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	6.24	3.21	3.96	3.23
增加之碳保存效益(元/公頃)*	9,353.31	5,867.43	8,206.98	6,213.31
增加之碳保存成本(元/公頃)	454,246.52	40,693.09	15,506.73	9,473.09
私人之經濟損失(元/公頃)	195,865.943	57,587.095	6,585.20	50,021.83
增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	15.50	7.50	10.83	7.45
延長2年 增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	12.23	6.12	7.80	5.78
增加之碳保存效益(元/公頃)*	18,352.47	11,247.13	16,240.43	11,174.69
增加之碳保存成本(元/公頃)	881,522.83	76,241.92	30,139.89	15,999.03
私人之經濟損失(元/公頃)	420,025.392	119,400.816	13,984.29	105,265.68
增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	23.59	10.79	16.07	9.83
延長3年 增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	18.00	8.77	11.52	7.59
增加之碳保存效益(元/公頃)*	27,003.80	16,184.13	24,102.06	14,745.02
增加之碳保存成本(元/公頃)	1,282,505.84	107,175.32	43,925.45	19,367.96
私人之經濟損失(元/公頃)	714,742.115	196,157.873	23,721.76	180,124.79
增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	31.00	13.81	21.20	11.19
延長4年 增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	23.54	11.17	15.12	8.62
增加之碳保存效益(元/公頃)*	35,313.55	20,720.39	31,793.99	16,785.22
增加之碳保存成本(元/公頃)	1,657,859.61	133,977.48	56,889.99	19,380.59

	私人之經濟損失(元/公頃)	1,071,588.279	283,945.616	35,536.20	274,220.00
	增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	38.19	16.60	26.21	11.44
延長5年	增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	28.86	13.37	18.61	8.81
	增加之碳保存效益(元/公頃)*	43,287.85	24,894.38	39,318.74	17,156.16
	增加之碳保存成本(元/公頃)	2,008,235.53	157,086.29	69,060.42	15,847.81
	私人之經濟損失(元/公頃)	1,483,267.210	379,686.934	49,192.75	387,188.96
	增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	45.15	19.16	31.12	10.48
延長6年	增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	33.96	15.36	21.98	8.10
	增加之碳保存效益(元/公頃)*	50,932.75	28,741.01	46,679.10	15,718.75
	增加之碳保存成本(元/公頃)	2,334,272.59	176,894.67	80,463.78	8,590.53
	私人之經濟損失(元/公頃)	1,943,430.949	480,964.435	64,480.27	518,683.63
	增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	51.89	21.53	35.92	8.22
延長7年	增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	38.84	17.19	25.25	6.45
	增加之碳保存效益(元/公頃)*	58,254.21	32,291.77	53,878.10	12,333.89
	增加之碳保存成本(元/公頃)	2,636,597.54	193,753.48	91,127.03	-
	私人之經濟損失(元/公頃)	2,446,532.010	585,881.553	81,208.82	668,368.23
	增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	58.40	23.72	40.61	4.57
延長8年	增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	43.51	18.86	28.41	3.80
	增加之碳保存效益(元/公頃)	65,258.12	35,574.92	60,918.94	6,862.46
	增加之碳保存成本(元/公頃)	2,915,825.10	207,975.05	101,076.88	-
	私人之經濟損失(元/公頃)	2,987,702.096	692,953.124	99,207.46	835,917.69
	增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	64.69	25.74	45.20	-
延長9年	增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	47.97	20.39	31.47	0.12
	增加之碳保存效益(元/公頃)*	71,950.25	38,615.77	67,804.94	-
	增加之碳保存成本(元/公頃)	3,172,558.18	219,836.96	110,339.67	-
	私人之經濟損失(元/公頃)	3,562,652.209	801,019.285	118,322.25	1,021,016.23
	增加之未折現碳保存量(噸/公頃)	70.75	27.62	49.69	-
延長10年	增加之折現後碳保存量(噸/公頃)	52.22	21.80	34.43	-
	增加之碳保存效益(元/公頃)*	78,336.31	41,436.96	74,539.51	-
	增加之碳保存成本(元/公頃)	3,407,388.03	229,585.75	118,941.30	-

資料來源：本研究整理。

註：* 碳保存效益以前述變數設定之每噸1,500元，未折現之碳保存量來計算。

IV、結論與建議

近年來全球已開始正視溫室氣體持續增加造成地球暖化之問題，全球氣候變遷與暖化的趨勢不可逆，各國之政策重點將轉往調適，包括減少林木砍伐、減少林地變更以及控制森林

火災與林木疫情等，各國政府紛紛提出自己的調適策略，此更顯見森林碳保存策略（conservation strategies）的重要性。本研究之主要研究目的為評估與估算碳保存策略（carbon conservation）之成本效益。在碳保存功能上，各國在森林經營策略上大致可以分成下列幾種，包括延長林木輪伐期、增進土壤碳匯管理、與森林火災有效經營等，本研究著重於研究最適輪伐期之相關文獻與模型，以及碳保存成本與效益評估模式，進一步分析延長輪伐期後，地主之利潤之損失，以及碳保存效益與碳保存成本之增加值。在分析方法上，本研究建構碳保存策略之理論評估模式，在國內林業資料取得困難下，試圖拼湊出完整的數據與變數設定，進而模擬分析碳保存量函數，進而分析碳保存策略與延長輪伐期之效益與成本，並嘗試與過去國內外文獻進行比較與分析。此架構期能適用於未來政府所實施與鼓勵延長輪伐期策略上，並提供後續研究之參考。

根據本研究之實證結果顯示，種植肖楠之土地期望價值在第24年最高，為56,702,530.68元，種植杉木之土地期望價值在第18年最高，為3,483,279.25元，種植相思樹之土地期望價值在第30年最高，為565,074.01元，種植光臘樹之土地期望價值在第23年最高，為236,059.48元。考慮碳價格後，種植肖楠之土地期望價值在第24年最高，為57,723,278.97元，種植杉木之土地期望價值在第18年最高，為4,062,174.85元，種植相思樹之土地期望價值在第30年最高，為1,336,684.45元，亦即相思樹之私人最適輪伐期為30年；最後，種植光臘樹之土地期望價值在第23年最高，為937,644.23元，相思樹之最適輪伐期為23年。比較可知，考慮碳價格後，其種植肖楠、杉木、相思樹與光臘樹之土地期望價值均提高，但是最適輪伐期不一定延長。雖然前人研究中，考慮碳價格的情況下，大多數會對龍罰期有影響，例如在Ekholm (2020) 的研究結果顯示，如每公噸的碳價格為100歐元，則土地的期望價值，會比未考慮碳價格時的土地價格高7到9倍 (Ekholm, 2020)。van Kooten et al. (2019) 研究中，使用0美元到250美元做敏感度分析，其結果亦顯示收穫的時間點會隨著碳價格的時間延後。因前人研究中，進行敏感度分析的碳價格差距較大，故可能醉於輪伐期之影響，會呈現較明顯的差異。

若追求未折現之邊際碳保存量極大，則四種樹種之最適林齡介於第8年至第16年，且其邊際碳保存量介於每公頃6.77噸至11.91噸；若追求折現後之邊際碳保存量極大，則四種樹種之林齡介於第8年至第15年，且其邊際碳保存量介於每公頃5.77噸至10.96噸；若追求未折現之總碳保存量極大，則四種樹種之林齡介於第28年至第100年，且其總碳保存量介於每公頃127.02噸至368.68噸；若追求折現後之總碳保存量極大，則四種樹種之林齡介於第28年至第100年，且其總碳保存量介於每公頃107.75噸至252.81噸。其次，在計算碳保存效益的部分，據過去文獻可知，將碳予以折現使未來之碳流量等於現在之碳流量是有必要的，其原因在於提早的碳保存將比較晚時間的碳保存更能提供其他部門進行減緩氣候變遷策略之緩衝效益。因此，本研究計算出肖楠在最適輪伐期第24年時，其未折現之碳保存量為每公頃175.95噸，經折現後之碳保存量為每公頃150.31噸，其碳保存效益介於每公頃281,838.34元至169,103.01元之間。

其次，杉木在最適輪伐期第18年時，其未折現之碳保存量為每公頃74.48噸，經折現後之碳保存量為每公頃65.89噸，其碳保存效益介於每公頃123,537.87元至74,122.72元之間。再者，相思樹在最適輪伐期第30年時，其未折現之碳保存量為每公頃164.33噸，經折現後之碳保存量為每公頃137.87噸，其碳保存效益介於每公頃258,507.31元至155,104.39元之間。最後，光臘樹在最適輪伐期第23年時，其未折現之碳保存量為每公頃115.58噸，經折現後之碳保存量為每公頃99.50噸，其碳保存效益介於每公頃186,571.19元至111,942.71元之間。

再者，計算碳保存成本的部分，以肖楠而言，其私有輪伐期為第20年，碳保存成本為每公頃12,944,876.951元，單位碳保存成本為每噸73,571.187元；以杉木而言，其私有輪伐期為第18年，碳保存成本為每公頃996,322.939元，單位碳保存成本為每噸13,376.795元；就相思樹而言，其私有輪伐期為第30年，碳保存成本為每公頃705,405.018元，單位碳保存成本為每噸4,292.515元；以光臘樹而言，其私有輪伐期為第23年，碳保存成本為每公頃353,426.67元，單位碳保存成本為每噸3,567.34元。本研究模擬之四種樹種之單位碳保存成本，以碳釋放比率為100%而言，則本研究計算出來之平均單位碳吸存成本在820.686元至85,427.450元之間，差距頗大，其中肖楠計算出來的單位碳保存成本顯然偏高，而其他三種樹種與國內外文獻上計算之單位碳成本大至相符，沒有明顯偏高。

進一步計算延長輪伐期之碳保存效益與成本，當延長輪伐期一年時，則種植肖楠之私人經濟損失為每公頃52,049.004元，增加碳保存量為每公頃8.09噸，增加的碳保存成本為每公頃454,246.52元；種植杉木之私人經濟損失為每公頃15,686.178元，增加碳保存量為每公頃3.91噸，增加的碳保存成本為每公頃40,693.09元；種植相思樹之私人經濟損失為每公頃1,815.61元，增加碳保存量為每公頃5.704噸，增加碳保存成本為每公頃15,506.73元；種植光臘樹之私人經濟損失為每公頃14,792.31元，增加碳保存量為每公頃4.14噸，增加碳保存成本為每公頃9,473.09元。

從結果看來，因目前利率過低，對於延長輪伐期與不延長輪伐期之影響較不顯著。若碳價格為每公噸1,500元，則台灣肖楠、杉木、相思樹和光臘樹之輪伐期介於18年至30年之間。目前政府希望實施森林生態系服務給付相關政策，若未來有機會進行給付評估，可考慮將時間成本納入計算。本研究之結果顯示，四種樹種中，考慮碳保存效益下以相思樹之最適輪伐期最長，達30年，而以台灣肖楠之最適輪伐期最短，達18年，故之後林地管理上需要進行相關規劃和評估，應將不同樹種之輪伐期差異納入考慮。

根據本研究結果，提出兩點建議 (1)建議政府應建立碳交易平台：研究結果顯示森林碳保存之效益，有其建立市場之價值，在建立可以進行碳交易之平台，有助於在進行森林經營規劃管理時，讓經營者可以將碳保存之效益計入，而調整整體的森林經營計畫與規劃方向。而其所產生的效益，也能幫忙減緩氣候變遷。 (2)建議政府應針對森林碳保存功能進

行森林生態系服務給付：因森林碳保存功能，具又公共財特質，具有非排他性以及非敵對性，在擁有公共財特性的情況下，若沒有建立相關的給付機制，很容易使森林碳保存之效益遭到忽略，故會建議政府針對森林所擁有的碳保存效益，進行森林生態系統服務給付之政策規劃，以利永續經營森林，使其提供永續的森林碳保存生態系統服務，減緩目前全球所面臨的氣候變遷與暖化情況。

從研究結果中，亦可發現台灣肖楠在最適輪伐期後，其碳保存成本與私人經濟損失的增加幅度相較於其他三種樹種大，台灣肖楠本身的木材價格較高，故在碳保存的機會成本上也會較高。杉木、相思樹以及光臘樹在延長輪伐期時，其所需要負擔的額外成本相較於台灣肖楠小，故若進行台灣肖楠之種植經營，應盡量在最適輪伐期砍伐，以減少延長砍伐後之經濟損失。

目前我國政府亦有在規劃生態系統服務相關給付政策，而碳保存效益亦為森林生態系統服務的一環，未將政府規劃給付森林生態系統服務之相關政策數據，納入本次的實證分析中。然而因若將森林之生態系統服務給付之相關金額納入考量，其政策的施行亦可能在未來成為影響碳保存成本之因素，林木的最適輪伐期的時間亦可能會有所更動。故在未來相關森林碳保存研究中，亦可將政府對於森林碳保存效益之相關政策納入實證分析。

本研究進行評估分析時，因未有較佳的氣候變遷評估數據，故未將氣候變遷對於森林經營的影響納入考量，若未來研究欲推估後續的碳保存效益價值，可考慮以數據整合的方式，將其影響併入分析考量。因氣候的改變可能影響樹木的長速度之外，其所造成的極端氣候，例如颱風、土石流、山崩、乾旱等災害的增加等，皆可能會改變整體的經營成本和效益，故未來若有可能整合相關資訊，亦可重新進行碳保存效益之評估。

參考文獻

一、中文文獻：

1. 行政院農業委員會 (2008)。《農業統計要覽》，台北：行政院農業委員會。取自 http://stat.coa.gov.tw/dba_as/As_root.htm。
2. 行政院農業委員會水利署 (2017)。「水利署電子報106年主要水庫水質概況」。2020年5月20日，取自：http://epaper.wra.gov.tw/Article_Detail.aspx?s=983C31386D879ABB。
3. 行政院農業委員會林務局 (2009)。林務局木材市價資訊系統，台北：行政院農業委員會林務局。取自<http://woodprice.forest.gov.tw/>。
4. 李國忠等 (2000)。「台灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析」，《台灣林業科學》。15(1)：115-123。
5. 林俊成等 (1999)。「柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究」，《台灣大學實驗林研究報告》。13 卷，1 期，51-60。
6. 林俊成等 (2002)。「全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估」，《台灣林業科學》。17 卷，3 期，311-321。
7. 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》。13卷，1期，1-35。
8. 洪良斌、羅卓振南 (1980)。「蓮華池林區肖楠造林木生長之研究」，《臺灣省林業試驗所試驗報告》，342號，1-12。
9. 胡大維 (1998)。「造林綠化挽救溫室效應危機」，《現代育林》。13卷，2期，4-6。
10. 張森、陳麗琴、任憶安 (1987)。「林務局普通施業地人工林生長與收穫分析」。《林業試驗所研究報告季刊》。2 (1)：17-25。
11. 陳麗琴、黃進睦 (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。
12. 楊浩彥 (1998)。「溫室氣體限量排放對臺灣經濟影響之研究：一般均衡分析」，《世新大學學報》。8卷，255-276。
13. 農業委員會林務局 (2010)。林務局木材市價資訊系統，台北：農業委員會林務局。取自 <http://woodprice.forest.gov.tw/report/木材市價區間統計平均報表.asp>。
14. 劉宣誠、吳萬益 (1984)。「光蠟樹造林木生長與生育地狀況關係之研究」。試驗報告第403號。
15. 劉宣誠、林銘輝、曲俊麒 (1981)。「大葉桃花心木造林木之生長及木材性質之研究」。林試所試驗報告第351號。

16. 劉浚明 (1997)。「疏伐作業影響輪伐期長短之研究」·《中華林學季刊》·30卷·1期·71-84。
17. 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。
18. 劉慎孝、林子玉 (1968)。「台灣中南部相思樹林分收穫表及材積表」·中興大學農學院森林學系·47頁。

二、英文文獻：

1. Adams, R. M., D. M. Adams, J. M. Callaway, C. C. Chang, and B. A. McCarl, (1993). Sequestering Carbon on Agricultural Land: Social Cost and Impacts on Timber Markets, *Contemporary Policy Issues*. 11(1): 76-87.
2. Alig R. J., Adams, D. M., McCarl, B. A., Callaway, J. M. and Winnett, S. M. (1997). Assessing effects of mitigation strategies for global climate change with an intertemporal model of the U. S. forest and agriculture sectors. *Environmental Resource Economics*. 9, 259-274.
3. Andrew J. P, and JunJie Wu, (2003). Co-Benefits from Carbon Sequestration in Forests: Evaluating Reductions in Agricultural Externalities from an Afforestation Policy in Wisconsin. *Land Economics* 79(1):74-85.
4. Barson, M. and Gifford, R. (1990). Carbon dioxide sinks, the potential role of tree planting in Australia, in *Greenhouse and energy*, edited by D.J. Swaine, CSIRO, Melbourne.
5. Callaway, J.M., and B.A. McCarl. (1996) The Economic Consequences of Substituting Carbon Payments for Crop Subsidies in U.S. Agriculture. *Environmental and Resource Economics* 7: 15-43.
6. Chladna, Z., (2007). Determination of optimal rotation period under stochastic wood and carbon price, *Forest Policy and Economics*. 9(8): 1031-1045.
7. de Jong, B. H., Ochoa-Gaona, S., Castillo-Santiago, M. A., Ramírez-Marcial, N., and Cairns, M. A. (2000). Carbon flux and patterns of land-use/land-cover change in the Selva Lacandona, Mexico. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(8), 504-511.
8. Dixon, J.A. et al. (1994). The role of speech accommodation and crime type in attribution of guilt. *Journal of Social Psychology*, 134, 465-473.
9. Dixon, R. K., J. K. Winjum, and P. E. Schroeder, (1993). Conservation and Sequestration of Carbon, *Global Environmental Change* 3(2): 159-173.
10. Dudek DJ, LeBlanc A. (1990). Offsetting new CO2 emission : a rational first greenhouse policy step. *Contemporary Policy Issues* 8: 29-42.
11. Fearnside, P.M. (1995). Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases. *Environmental Conservation* 22(1): 7-19.
12. Hartman, R., (1976). The Harvesting Decision When a Standing Forest Has Value, *Economic Inquiry*, 14: 52-58.
13. Hoen, H.F. & B. Solberg (1994). Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science*, 40:429-451.

14. Hoen, H.F. & B. Solberg, (1997). CO₂-taxing, timber rotations, and market implications. In: Sedjo, R.A., R.N. Sampson & J. Wisniewski (eds.): *Economics of carbon sequestration in forestry*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 27:151-162.
15. Hoen, H.F. & B. Solberg, (1997). CO₂-taxing, timber rotations, and market implications. In: Sedjo, R.A., R.N. Sampson & J. Wisniewski (eds.): *Economics of carbon sequestration in forestry*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 27:151-162.
16. Houghton, R. A., J. Unruh, et al. (1993). Current Land Cover in the Tropics and its Potential for Sequestering Carbon. *Global Biogeochemical Cycles* 7(2): 305-320.
17. Huang, S. L., L. C. Wu, H. D. Huang, H. K. Liang, M. T. Ko, and J. T. Horng. (2004). A probabilistic method to correlate ion-pairs to protein thermostability. *Applied Bioinformatics* 3:21-29.
18. IPCC, (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 pp.
19. Lewis, D.K., Turner, D.P. & Winjum, J.K. (1996). An Inventory-based Procedure to Estimate Costs of Forest Management on a Regional Scale to Conserve and Sequester Atmospheric Carbon, *Ecological Economics*, 16(1): 35-49.
20. Lin, J. Y., Chen, Y. C. and Chang, C. T. (2020). Costs and environmental benefits of watershed conservation and restoration in Taiwan. *Ecological Engineering*. 142, 105633.
21. Makundi, W., & Okitingati, A., (1995). Carbon flows and economic evaluation of mitigation options in Tanzania's forest sector. *Biomass Bioenerg.* 8, 369–380.
22. Marland, G., Schlamadinger, B. and Leiby, P. N. (1997). Forest/biomass based mitigation strategies: Does the timing of carbon reductions matter? *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 27, 213-226.
23. Masera, O. R., M. R. Bellon, et al. (1995). "Forest Management Options for Sequestering
24. Moulton, R. and K. R. Richards (1990). *Costs of Sequestering Carbon through Tree Planting and Forest Management in the United States*. Washington D.C., U.S. Department of Agriculture.
25. Murray B. C., McCarl, B. A. and Lee, H. C. (2004). Estimating Leakage from Forest Carbon Sequestration Programs. *Land Economics*, 80(1), 1-38.
26. Newell R.G., A.B. Jaffe and R.N. Stavins, (1999). The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change, *Quarterly Journal of Economics*, 114(3):941-75.
27. Newell, R. and R. Stavins, (2000). Climate Change and Forest Sinks: Factors Affecting the Costs of Carbon Sequestration. *Journal of Environmental Economics and Management*, 40(3): 211-235.
28. Nordhaus, W. (1991). The Cost of Slowing Climate Change: A Survey. *The Energy Journal* 12(1): 37-65.
29. Parks, P. J. and I. W. Hardie, (1995). Least-Cost Forest Carbon Reserves: Cost-Effective Subsidies to Convert Marginal Agricultural Land to Forest. *Land Economics* 71(1): 122-136.
30. Pfaff, A. Juan, R. and Sanchez-Azofeifa, G. A. (2008). Payments for Environmental Services: Empirical Analysis for Costa Rica. Online Available: https://www.researchgate.net/publication/228707178_Payments_for_Environmental_Services_Empirical_Analysis_for_Costa_Rica.
31. Plantinga, A.J. (1999). Technological Change is Shaping Operating Strategy in the Maine Pulp-and-Paper Industry. *Maine Management Review* 1(1):16-24.

32. Plantinga, A.J., and J. Wu. (2003). Co-Benefits from Carbon Sequestration in Forests:
33. Plantinga, A.J., and T. Mauldin. (2001). A Method for Estimating the Cost of CO₂ Mitigation Through Afforestation. *Climatic Change* 49:21-40.
34. Plantinga, A.J., Mauldin, T., and D.J. Miller. (1999). An Econometric Analysis of the Costs of Sequestering Carbon in Forests. *American Journal of Agricultural Economics* 81(4):812-24.
35. Plantinga, A.J., Mauldin, T., and R.J. Alig. (1999). Land Use in Maine: Determinants of Past Trends and Projections of Future Changes. U.S. Forest Service, Pacific Northwest Station Research Paper PNW-RP-511.
36. Price, C. and R. Willis, (1993). Time, discounting, and the valuation of forestry's carbon fluxes. *Commonwealth Forestry Review*, 72(4): 265-271.
37. Ravindranath, N. H. and Somashekar, B. S. (1995). Potential and economics of forestry options for carbon sequestration in India. *Biomass and Bioenergy* 8(5): 323-336.
38. Richards, K. (1997). Estimating Costs of Carbon Sequestration for a United States Greenhouse Gas Policy. Report prepared for Charles River Associates.
39. Richards, K. R. and C. Stokes, (2004). A Review of Forest Carbon Sequestration Cost Studies: A Dozen Years of Research. *Climatic Change* (68): 1-48.
40. Richards, K., Moulton, R. and Birdsey, R. (1993). Costs of Creating Carbon Sinks in the U.S. *Energy Conservation and Management*, 34(9-11): 905-912.
41. Sampson, R.N. and R.A. Sedjo, (1997). Economics of Carbon Sequestration in Forestry: An Overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27: S1-S8.
42. Sedjo, R. A. and A. M. Solomon, (1989). Climate and Forests. In *Greenhouse Warming : Abatement and Adaptation*. N.J. Rosenberg, W.E. Easterling, P.R. Crosson, and J. Darmstadter (eds.), Resources for the Future, Washington DC, pp. 105-120.
43. Sedjo, R., (1999). Potential for Carbon Forest Plantations in Marginal Timber Forests: The Case of Patagonia, Argentina. Discussion Paper 99-27 Resources for the Future. Resources for the Future, Washington DC, USA, pp. 141-174.
44. Slangen, L. and van Kooten, G. C., (1996). Economics of Carbon Sequestration in Forests on Agricultural Land in the Netherlands. Draft Paper.
45. Sohngen, B. and Mendelsohn, R., (2001). Optimal Forest Carbon Sequestration. Draft Paper.
46. Solberg, C. A. (1997). A Framework for Analysis of Strategy Development in Globalizing Markets, *Journal of International Marketing*. Vol. 5. No. 1, pp. 9-30.
47. Stavins, R. N. (1999). The Costs of Carbon Sequestration: A Revealed-Preference Approach. *American Economic Review*, 89(4): 994-1009.
48. Tang, W. and Zhang, S. (2018). Optimal decision model and solution for carbon sequestration by afforestation, *Computers & Mathematics with Applications*, 76(10), 2484-2495.
49. Tasman Institute, (1994). A Framework for Trading Carbon Credits from New Zealand's Forests, Report C6, Tasman Economic Research Pty Ltd. Melbourne, Australia.
50. UNFCCC, (2010). United Nations Climate Change Conference, Cancun 2010. Available from: <http://www.fao.org/climate-change/international-fora/major-events/unfccc-cop16/en/>.
51. van Kooten, C. G., Eagle, A. J., Manley, J. and Smolak, T. (2004). How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sinks, *Environmental Policy Science*, 7, 239-251.

52. van Kooten, G. C., Arthur, L. M. and Wilson, W. R. (1992). Potential to sequester carbon in Canadian forests: Economic considerations. *Canadian Public Policy XVIII*: 127-138. In: Sedjo, R. A., Wisniewski, J., Sample, A. V. and Kinsman, J. D. 1995. The economics of managing carbon via forestry: Assessment of existing studies. *Environmental and Resource Economics* 6: 139-165.
53. van Kooten, G. C., Binkley, C. S. and Delcourt, G. (1995). Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. *American Journal of Agricultural Economics* 77: 365-374.
54. van Kooten, G. C., Stennes, B., Krcmar-Nozic, E. and Van Gorkom, R. (2000). Economics of afforestation for carbon sequestration in western Canada. *The Forestry Chronicle* 76(1): 165- 172.
55. Wangwacharakul, V. and Bowonwiwat, R., (1995). Economic Evaluation of CO2 Response Options in the Forestry Sector: The Case Thailand, *Biomass Bioenergy* 8 (5), 293–308.
56. Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ranindranath, N. H., Verardo, D. J., Dokken, D. J. (2000). Land use, land-use change and forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.
57. Xu, D. (1995), The Potential for Reducing Atmospheric Carbon by Large-Scale Afforestation in China and Related Cost/Benefit Analysis, *Biomass Bioenergy*, 8 (5), 337–344.
58. Ekholm, T. (2020). Optimal forest rotation under carbon pricing and forest damage risk. *Forest Policy and Economics*, 115. 102131.
59. Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., Herrero, M., Kiesecker, J., Landis, E., Laestadius, L., Leavitt, S. M., Minnemeyer, S., Polasky, S., Potapov, P., Putz, F. E., Sanderman, J., Silvius, M., Wollenberg, E. and Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44), 11645-11650.
60. Favero, A., Mendelsohn, R. and Sohngen, B. (2017). Using forests for climate mitigation: sequester carbon or produce woody biomass? *Climate Changing*, 144 (2), 195-206.
61. van Kooten, G. C., Johnston, C. M. T. and Mokhtarzadeh, F. (2019). Carbon uptake and forest management under uncertainty: why natural disturbance matters. *Journal of Forest Economics*, 34, 159-185.