

考慮碳吸存價格下最適輪伐期與 土地期望價之實證分析

林國慶*、柳婉郁**

在京都議定書的規範下，採用經濟誘因方式鼓勵造林來增加森林碳吸存，一般被認為是達到減量標準的有效方式。本研究分析私有林在最適管理策略下之碳吸存誘因效果，其理論模型修正自 Hoen (1994) 與 Murray (2003) 之最適輪伐期模型，藉由碳吸存價格下森林最適輪伐期理論之引入，除修正原木價格與造林成本隨林齡變動外，亦考量砍伐成本，並考慮台灣現況以追求林地期望價值極大化，模擬分析杉木在不同碳價格對最適輪伐期、碳吸存效果、土地期望價與碳吸存機會成本之影響，以及分析碳價格是否對已成林地有縮短輪伐期之效果。根據本研究以杉木為例之模擬結果，若為裸露林地，考慮碳價格為每公噸 1,400 元以上時，地主將會延長輪伐期為 28 年以上（不存在碳價格時之輪伐期為 20 年），林地期望價值提升為每公頃 3,845,261.01 元，碳吸存量每公頃將增加為 2,192.20 公噸。其次，對於開始給予獎勵給付時林齡為 10 年之杉木已林地，若碳價格為每公噸 1,000 元以上時，則地主之最佳決策為立即砍伐林木，再予以重新造

* 林國慶為國立台灣大學農業經濟系教授

** 柳婉郁為國立台灣大學農業經濟系博士班研究生。

本文初稿承蒙兩位匿名評審提供諸多寶貴意見，特此致謝。惟文中若有任何疏失之處，當屬作者之責。

農業經濟叢刊 (Taiwanese Agricultural Economic Review) , 13:1 (2007) , 1-35。

臺灣農村經濟學會出版

林，以提早進入領取碳價格之階段，故林齡為 10 年以下之林地將會被立即砍伐，造成森林外部效益之減損。台灣目前並沒有碳價格，但為了因應國際溫室氣體減量，未來無論是進行課徵碳稅、建立碳排放交易或碳價格給付等機制，都會對現存低林齡之已成林產生提早砍伐之誘因。若政府同時對新植造林與已成林之碳吸存提供碳價格給付，也可減輕已成林地提早砍伐的問題，其減輕程度則視對已成林之給付水準而定。

關鍵詞：碳吸存、最適輪伐期、碳價格、林業政策。

I、前言

全球平均溫度在 20 世紀有不斷增加的趨勢，一般將此地球暖化現象歸因於大氣中各式氣體含量的不斷增加，其中尤以 CO₂ 的增加得到特別的重視。自從西方工業革命至今，CO₂ 濃度增加約 28%，針對此增加趨勢，人類若不採取任何防治措施，科學家預測到西元 2100 年，地表溫度將會增加 1°C 至 3.5°C，海平面將上升 15 至 95 公分，此將會對地球上的氣候與生態環境產生深遠的影響（林國慶，2006）。

在國際方面，關於大氣中溫室氣體的增加趨勢以及其對全球氣候產生破壞之潛力受到國際重視，並積極採取行動以減少 GHG 之排放。經過各方的努力，聯合國氣候變化綱要公約（The Framework Convention on Climate Change，以下簡稱 FCCC）於 1994 年 3 月 21 日生效，成為正式之國際法，它具體規定管制溫室氣體排放的數量與時程（註 1）。俄羅斯國會於 2004 年 7 月 29 日批准京都議定書後，京都議定書在 2005 年 2 月 16 日正式生效並開始實施（註 2）。雖然我國至今仍非締約國，但是二氧化碳排放量居全球第 22 名（林國慶，2006），未來勢必會受到 FCCC 締約國之壓力，要求我國進行碳排放減量。我國在 2005 年全國能源會議的結論中亦提到要推動二氧化碳減量政策措施，包括二氧化碳排放交易制度、課徵碳稅以及增加森林碳吸存等。

森林可產生各種外部效益，其中之一即為碳吸存效益。根據 Watson *et al.* (2000) 之研究，在陸地生態系中，一半以上的碳被儲存在森林及土壤中。森林生態系透過光合作用將大氣中之二氧化碳轉換成森林碳元素，儲存在森林之樹幹、根部、其他枝葉，以及落葉及土壤中。若就碳排放而言，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，以下

簡稱 GHG) 的相關政策措施時, 「森林」佔有非常重要的地位, 提升森林在碳吸存的功能與貢獻成爲減少大氣中二氧化碳之重要策略之一 (Clinton & Gore, 1993; Dixon *et al.*, 1993; Sampson & Sedjo, 1997)。當林地爲私人所有時 (註 3), 若社會期許林地經營目標之一爲增加碳吸存量, 則政府或社會必須針對森林所吸存的碳提供經濟誘因, 以促使私有林主放棄部分經濟機會, 增加森林碳吸存的效能。換言之, 政府或社會必須建立經濟誘因機制, 以促使私有地主提升森林的碳吸存能量。目前世界各國已經實施各種政策措施來增進森林的碳吸存功能, 這些措施包括課稅、補貼與成本分擔等 (Cubbage, 2003) (註 4)。在這些措施中針對碳吸存所訂定的給付價格, 本研究皆稱爲碳價格 (carbon price), 此價格爲地主所造林地吸存一單位碳所獲得的貨幣給付。此碳價格可能由政府提供, 由碳排放公司或廠商支付, 或是碳交易市場上存在的市場交易價格。根據 Murray (2003) 研究指出, 若林地地主能由碳吸存中得到碳價格給付, 碳的總吸存量將增加, 並影響土地之最適分配。

京都議定書中明訂『1990 年以後所進行之新植造林、更新造林及森林伐採所吸收或排放二氧化碳之淨值, 可併入排放減量值計算』, 林業部門在二氧化碳排放減量政策措施上將可扮演重要角色。然倘若碳價格之給付對象僅針對這段期間的新植造林, 則將對在 1990 年前種植之林木增加砍伐誘因, 亦即在京都議定書規範下之碳價格給付可能使得已成林之地主提前砍伐 (Schlamadinger & Marland, 1998; Marland & Schlamadinger, 1999; Murray, 2000、2003)。此種伐木行爲會使原來固定在森林中的碳加速釋放到大氣中 (註 5), 並減少森林產生的非木材效益, 如涵養水源、調節空氣等效益。

我國目前並沒有碳價格存在, 但爲了因應國際溫室氣體減量, 無論未來可能建立的機制是課徵碳稅、碳排放交易或給付碳價格, 此機制對已成林之影響是值得關注的問題。有關這方面的國外文獻很多 (Van Kooten、Binkley & Delcourt, 1995; Romero、Ros & Daz-Balteiro, 1998; Appels, 2001;

Murray, 2000、2003；Chladna, 2007），而國內則付之闕如，例如若未來我國建立碳價格給付制度，此對最適輪伐期、碳吸存量、土地期望價以及逐年砍伐量等影響方面，國內無相關之實證研究。本研究之實證分析探討在考慮針對森林之碳吸存給予碳價格給付下，對杉木之最適輪伐期、碳吸存量、土地期望價以及木材產值之影響。本研究之理論模型修正自 Hoen (1994) 與 Murray (2003) 之最適輪伐期模型，除木材價格與造林成本修正為隨林齡變動外，亦加入砍伐成本，並根據台灣現況做模型修正。以追求林地期望價值極大化為目標，模擬分析在不同碳價格下對林地最適輪伐期及土地期望價之影響，實證模型以我國之裸露林地與已成林地為例，探討碳價格對最適輪伐期與碳吸存量之影響。本研究分成四節，第一節為前言，第二節為理論模型與分析，第三節為實證結果分析，第四節為結論與建議。

II、理論模型與分析

在森林經營管理策略中，一般的分析方式為固定林分面積模式下進行分析（stand-level analysis）。Davis 與 Johnson (1987) 定義單位森林林分（forest stand）為具備有齊次性（homogeneous）、地理上連續性（continuous）、單位林分上種植相同樹種等特性。林分分析與其他如森林分析（forest-level）、區域分析（regional analysis）或全球分析（global analysis）等比較，林分分析模式是森林供給函數之核心，最適輪伐期之模型亦是建立在林分分析之基礎上（註 6）。以下針對兩部分來進行分析，包括考慮碳價格下裸露林地之最適輪伐期以及考慮碳價格下已成林地之最適輪伐期。

2.1 考慮碳價格下之最適輪伐期-裸露林地

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)、Hoen 與 Solberg (1997)、Van Kooten、Binkley 與 Delcourt (1995)、以及 Solberg (1997) 等相關研究。本研究延續上述最適輪伐期之模型，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 (2003) 之最適輪伐期模型，將碳價格市場化後，本研究加入木材價格隨林齡變化與造林成本隨林齡變化之修正（註 7），故推出地主追求林地期望價值最大之最適輪伐期，其模型如下式（註 8）：

$$\begin{aligned} \text{Max } LEV_{TC} = & [p(T)Q(T)e^{-rT} - \sum_{t=0}^T R(t)e^{-rt} + \int_0^T vC'(t)e^{-rt} dt \\ & - [vC(T) \int_0^D d(s)e^{-rs} ds] e^{-rT}] [1 - e^{-rT}]^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 LEV_{TC} 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 時之碳吸存量， v 為每單位碳吸存之碳價格， 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。 $[p(T)Q(T)e^{-rT} - \sum_{t=0}^T R(t)e^{-rt}]$ 為林木砍伐收入之淨現值， $\int_0^T vC'(t)e^{-rt} dt$ 為碳吸存收入之淨現值， $vC(T) \int_0^D d(s)e^{-rs} ds$ 為林木砍伐後支付碳釋放價格之淨現值。

最適輪伐期由(1)式對 T 微分後之一階條件所決定，得下式：

$$\begin{aligned} p'(T)Q(T) + p(T)Q'(T) + vC'(T)[1 - \int_0^D d(s)e^{-rs} ds] + r[vC(T) \int_0^D d(s)e^{-rs} ds] \\ = R(T) + r[p(T)Q(T)] + r[LEV_{TC}] \end{aligned} \quad (2)$$

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，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)額外增加碳吸存之市場價值，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。

上述第(2)式為考慮碳價格之一階條件式，若未考慮碳價格時，則第(2)式可改寫成爲第(3)式：

$$p'(T)Q(T) + p(T)Q'(T) = R(T) + r[p(T)Q(T)] + r[LEV_T] \quad (3)$$

在(2)式與(3)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(3)式之 T^* 長，因爲一般延長一單位之輪伐期所得之碳吸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、Binkley & Delcourt, 1995；Hoen & Solberg, 1997；Murray, 2000 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（註 9）。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，進而影響碳吸存量。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 & Willis, 1993；Fearnside, 1995；Marland、Schlamadinger & Leiby, 1997），雖然在環境議題中，資源是否需要折現是頗爲爭議的，但在動態過程之經濟分析中，折現仍然是必須的（註 10）。因此將碳吸存量加總再予以時間折現得下式：

$$S_0 = \left[\int_0^T C'(t)e^{-rt} dt - [C(T)\int_0^D d(s)e^{-rs} ds]e^{-rT} \right] [1 - e^{-rT}]^{-1} \quad (4)$$

如(7)式， S_0 代表碳吸存量之現值。輪伐期越長，將會延長碳量在生物體之時間，碳吸存累積更多，也因此延緩碳釋放至大氣或製成林產品之時間。而碳吸存量之動態方程式為下式：

$$S_0' = [(1 - \int_0^D d(s)ds)C'(T) + rC(T) \int_0^D d(s)ds - rS_0][e^{rT} - 1]^{-1} \quad (5)$$

2.2 考慮碳價格下之最適輪伐期-已成林地

上述 2.1 節之觀點是以裸露林地來衡量，碳吸存效果與土地期望價均從林齡為第 0 年開始衡量，因此上述均假設碳價格開始給付後，此林地才開始種植林木。然根據京都議定書減量規範，1990 年以後所進行之新植造林、更新造林及森林伐採所吸收二氧化碳之淨值，才可併入排放減量值之計算，因此若在京都規範下，碳價格給付對象僅針對新植造林地，則對於已成林地之輪伐期勢必會造成影響，如此是否會縮短已成林地之輪伐期，進而加速已成林地之伐木行為？要進行這方面之分析，分析對象必須將裸露林地轉為已成林地，並進一步檢驗給付基準年（註 11）以前之碳吸存效果。在基準年前種植林木之已成林地，其最適輪伐期可能因為碳價格的存在，而不同於新植造林之最適輪伐期。基準年以前所種植之森林，在基準年之後的第一個輪伐期間稱為「第一個輪伐期」，結束第一個輪伐期後，之後的現金流量與裸露林地相同，故第二個輪伐期以後之輪伐期長度必會與新植造林地（即裸露林地）之最適輪伐期相同，故在追求林地期望價值最大下，已成林地之地主決策模式如下式：

$$\text{Max } PVF = [p(T_1)[Q(T_0) + \int_{T_0}^{T_1} Q'(t)dt] + LEV_{TC}]e^{-r(T_1-T_0)} \quad (6)$$

PVF 為已成林地在基準年時林地期望價值之淨現值， T_0 為在基準年時林

分之林齡， T_1 為目前現存林分之第一個輪伐期長度。 $[Q(T_0) + \int_{T_0}^{T_1} Q'(t)dt]$ 為第一個輪伐期 T_1 結束時砍伐之材積， $p(T_1)[Q(T_0) + \int_{T_0}^{T_1} Q'(t)dt]$ 為第一個輪伐期 T_1 結束林木砍伐之木材收入。由第(6)式可知，已成林地之林地期望價值等於目前所處輪伐期結束後之木材收入淨現值，加上砍伐後未來無窮期之木材收入與碳吸存收入之淨現值。因此，考慮碳價格下，已成林地之林地期望價值為有碳價格給付之淨現值（此部分即為 LEV_{TC} ），與基準年前無碳價格給付之淨現值（即僅有木材收入）之加總。換言之，在基準年以前種植的林木，必須在數年後砍伐再重新種植，其新植林木產生的碳吸存，才能領取碳價格給付。已成林地之「第一個最適輪伐期 T_1 」，可由第(6)式對 T_1 微分得到一階條件式所決定：

$$p(T_1)Q'(T_1) = r[p(T_1)Q(T_1)] + r[LEV_{TC}] \quad (7)$$

由於已成林地第一個輪伐期（ T_1 ）只有木材收入而無碳價格之收入，因此最適輪伐期將類似於 Faustmann 模式下之最適輪伐期，亦即延緩一單位之輪伐期邊際利潤將等於延緩砍伐之木材收入利息損失與延緩砍伐之林地期望價值利息損失之加總。此時已成林地不砍伐之機會成本將等於 LEV_{TC} 而非 LEC_T ，因為在基準年以前種植之林木在砍伐後之林地期望價值將等於木材收入加上碳價格收入，因此就已成林地而言，碳價格增加，將會提升不砍伐之機會成本，因此，在第(7)式之最適輪伐期 T^* 會比第(3)式之最適輪伐期 T^* 來得小，因此地主將會因為碳價格存在而縮短輪伐期，以提早進入可領取碳價格之階段。

若碳價格給付對象不僅只有新植林地也包括已成林地，且碳價格給付水準相同，則已成林地之期望價值將與第(1)式相同，此情況下地主並不會有誘因來縮短第一個輪伐期。換言之，若碳價格給付對象包括新植造林地與已成林地，則可避免提早砍伐已成林之情形出現。

III、實證結果分析

3.1 實證模型

根據第二節之理論模型，本節以林主種植杉木為例（註 12），實證模擬分析裸露林地在不同碳價格下之最適輪伐期及林地之期望價值。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 (2003) 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：

$$\text{Max } LEV_{TC} = [p(T)Q(T)e^{-rT} - \sum_{t=0}^T Re^{-rt} + \sum_{t=0}^T vC'(t)e^{-rt}] [1 - e^{-rT}]^{-1} \quad (8)$$

其一階條件式如下：

$$p'(T)Q(T) + p(T)Q'(T) + vC'(T) = R(T) + r[p(T)Q(T)] + r[LEV_{TC}] \quad (9)$$

另外，就已成林地而言，亦即在京都議定書之基準年以前已經種植之林木，地主必須先決定第一個輪伐期長度，進而決定第二個及以後之輪伐期長度。故本研究之實證模型中，第一個輪伐期 (T_1) 之決策方式如 (6) 式，其一階條件式如 (7) 式。

透過上述兩種實證模型，本研究以杉木為例進行模擬分析，模擬對象包括裸露林地與已成林地，分析碳價格給付對最適輪伐期、林地期望價值以及總碳吸存量之影響。

3.2 變數設定與估計

3.2.1 原木成長收穫函數

依據各種輪伐期的計算公式，若欲得出某一樹種之最適輪伐期，需先建立該樹種的生長收穫函數。就台灣種植之杉木人工林而言，根據陳麗琴與黃進睦（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與鍾旭和（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），本研究依據此迴歸式之成長率來推估第 1-7 年及第 21 年以上的原木材積，以求能更接近實際情況。

表 1 杉木之林齡、材積與原木價格

林齡(年)	8	10	12	14	16	18	20
材積 (m ³ /ha)	86.86	99.35	114.75	133.93	153.23	173.79	197.06
原木價 (元/ha)	168,475.00	225,605.00	288,812.00	363,092.00	439,690.00	521,283.00	612,060.00
原木價 (元/m ³)	1,939.62	2,270.81	2,516.88	2,711.06	2,869.48	2,999.50	3,105.96

資料來源：陳麗琴與黃進睦（1992）。

註：材積（m³/ha）及原木價（元/ha）參考自陳麗琴與黃進睦（1992）之計算，而原木價（元/m³）為本研究換算而得。

3.2.2 木材單位價格函數之估計

根據陳麗琴（1987）對於杉木原木最適造林研究中，利用當時的杉木原木價格、規格與截取長度等資料，使用動態規劃法（dynamic programming），

由當時販賣市場之杉木原木價，進而求得各齡級各直徑級之原木價，進而累計求得各齡級每公頃原木總價值（註 13），詳如表 1。本研究乃利用其原木價之基本資料（第 8 至 20 年之原木價資料）重新建立原木價格函數為 $p(t) = 352.11 + 242.75t - 5.284t^2$ ，其 $R^2 = 0.9988$ （註 14），其中 $p(t)$ 為原木價格函數（元/立方公尺）， t 為林齡（註 15）。

3.2.3 造林成本與管理費用之估計

造林成本包括育苗成本、出栽成本、除草成本等。再造林時所需的苗木如果是由林務機關提供，則其育苗成本較不容易估算，但如併入出栽成本，則出栽成本可由承包商的承包價格來估算，每公頃 30,000 元。除草成本是根據栽植後前六年，每年三次，每次每公頃 4,000 元，總共每公頃 72,000 元，因此估算造林成本是每公頃 102,000 元，管理費為每年每公頃 450 元（劉浚明，1997）。另外，砍伐成本是根據 2003 年之林業統計，公私有林平均砍伐費用為 103,122 元（行政院農業委員會林務局，2005）（註 16）。

3.2.4 折現率之估計

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 3% 為基準，假設風險貼水為 2%，長期通貨膨脹率為 2%，名目折現率為 3%，並以連續複利來計算。

3.2.5 森林碳吸存效益函數之估計

關於森林二氧化碳吸存量，由於不同樹種對二氧化碳之吸存能力不盡然相同，就杉木而言，本研究引用林俊成等（2002）之研究結果，並據此推算逐年碳吸存量之函數，由於林俊成等（2002）之研究式所推估的碳吸存效益之林齡介於第 6 年至第 20 年，本研究進行實證模擬前，有必要估計杉木林

齡自第 0 年至第 6 年各年碳吸存量。根據估計為 $C(t)=0+5.5908t$ ，其中 t 為杉木之林齡， $C(t)$ 為森林碳吸存效益函數（此指碳吸存函數）， R^2 值為 99.75%（註 17）。

3.3 實證模擬結果與分析

根據上述之變數設定與估計，以下對於有無存在碳價格之影響進行模擬分析，包括對於裸露林地（bare land）與已成林地（existing stands）兩者進行分析。其實證分析內容包含如下：(1) 敏感度分析：固定杉木價格下，碳價格變動對最適輪伐期之影響；以及固定碳價格下，杉木價格變動對最適輪伐期之影響。(2) 裸露林地：考慮杉木價格隨時間變動，不同碳價格對最適輪伐期與林地期望價值之影響；並進一步估計杉木在不同碳價格下之碳供給函數，以及估計杉木碳吸存之機會成本。(3) 現有林地：考慮杉木價格隨時間變動，不同碳價格對於第一個最適輪伐期與第二個最適輪伐期與林地期望價值之影響。

3.3.1 不同碳價格與木材單位價格之敏感度分析

本研究之實證模擬結果如表 2，表 2 為杉木在不同碳價格與不同木材價格之敏感度分析結果（註 18），包括在木材單位價格固定下，不同碳價格對最適輪伐期與林地期望價值之影響；以及碳價格固定下，不同木材單位價格對最適輪伐期與林地期望價值之影響。由表 2 可知，在沒有碳價格給付下，若木材單位價格固定為每立方公尺為 2,500 元時，杉木之最適輪伐期為 18 年，且林地之林地期望價值為每公頃 684,304.12 元。隨著碳價格之增加，最適輪伐期會增長且林地期望價值會增加（如圖 1）。當碳價格為每公噸 600 元時，杉木之最適輪伐期將延長為 28 年（註 19），林地之林地期望價值則增加為每公頃 1,853,456.89 元。當碳價格在每公噸 600 元以下時，碳價格變動對最適輪伐期之影響較小，而當碳價格超過每公噸 600 元時，碳價格變動

對最適輪伐期之影響則較為顯著。值得注意的是，當碳價格越高，則林地之期望價值曲線越趨平坦，尤其愈接近曲線尾端則愈平坦（圖 1）；當碳價格高到一定水準以上，則最適輪伐期附近時點之林地期望價值差異不大，即砍不砍伐之淨現值差異不大。

另一方面，如表 2，當碳價格固定時，隨著木材價格越高，最適輪伐期將會越短，且林地期望價值越高。例如碳價格固定在每公噸 600 元，若木材價格由每立方公尺 2,000 元增加至每立方公尺 3,500 元，最適輪伐期將由 34 年縮短為 24 年，而林地期望價值由每公頃 1,709,509.31 元增加至每公頃 2,200,262.04 元（如圖 2）。木材單位價格在每立方公尺 3,000 元以下時，木材價格變動對最適輪伐期較大，當木材單位價格超過每立方公尺 3,000 元時，木材價格變動對最適輪伐期之影響較小。另外由圖 2 可知，當木材價格越低，則最適輪伐期越長，此時林地期望價值曲線也越平坦，表示不同輪伐期之林地期望價值差異也越小，因此延緩一單位輪伐期之損失亦較小。由表 2、圖 1 及圖 2 可知，就比例而言，林地期望價值對於碳價格與木材價格之變化敏感度差異不大，當碳價格由每公噸 200 元增加兩倍時，林地期望價值增加 37.36%；而當木材價格由每立方公尺 2,000 元增加兩倍時，則林地期望價值增加 39.78%。換言之，碳吸存與木材收入兩者之間可視為替代關係，亦為地主進行決策時之抉擇（trade-off）標的。

表 2 不同碳價格與木材價格組合下杉木最適輪伐期、林地期望價值之效果

不同碳價格(木材價格固定為\$2,500/m ³)						
碳價格(元/公噸)	0	200	400	600	800	1,000
最適輪伐期(年)	18	21	24	28	34	43
林地期望價值(元/公頃)	684,304.12	1,038,360.58	1,429,063.80	1,853,456.89	2,309,815.59	2,797,136.36
不同木材價格(碳價格固定為\$600/公噸)						
木材價格(元/m ³)		2,000	2,500	3,000	3,500	4,000
最適輪伐期(年)		34	28	25	24	22
林地期望價值(元/公頃)		1,709,509.31	1,853,456.89	2,020,224.56	2,200,262.04	2,389,600.40

資料來源：本研究整理。

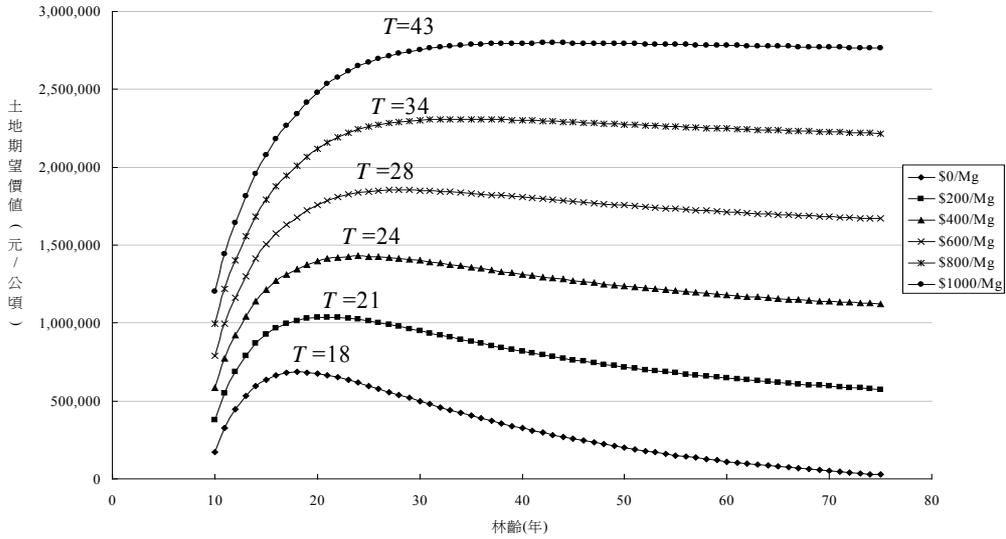


圖 1 不同碳價格下杉木最適輪伐期與林地期望價值

資料來源：本研究整理

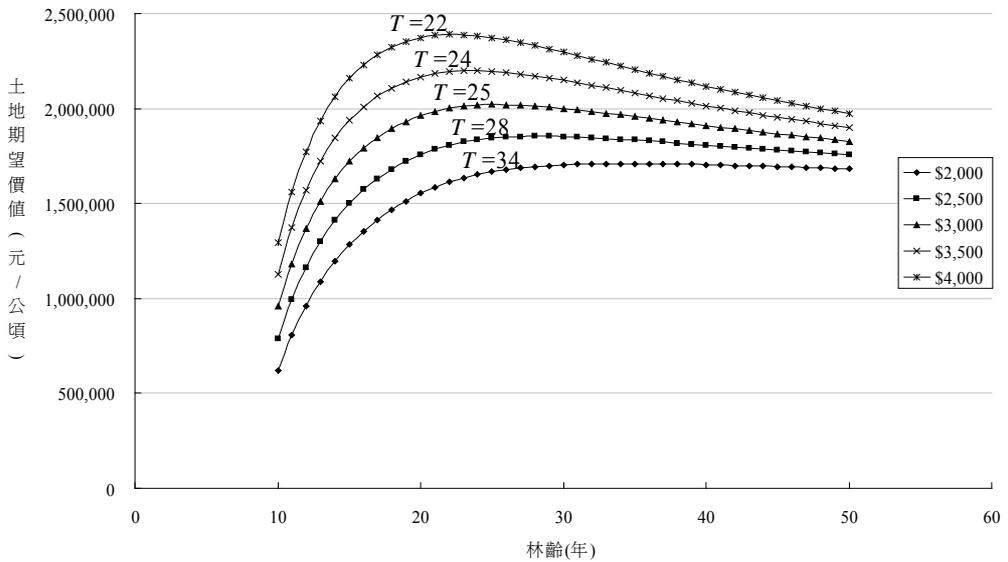


圖 2 不同木材單位價格下杉木最適輪伐期與林地期望價值

資料來源：本研究整理

3.3.2 考慮木材價格變動下不同碳價格對於碳吸存量與最適輪伐期之影響

上述之敏感度分析假設木材價格不隨林齡而變動，若考慮木材價格價格為林齡之函數，則在不同碳價格下之實證模擬結果如圖 3，橫軸為林齡，縱軸為無窮期下之總碳吸存折現值。由圖 3 可知，碳價格之高低將會影響輪伐期與碳吸存量，例如當碳價格增加（0 元增加至 1,000 元）時，將使最適輪伐期加長，而碳吸存之期間較長，碳排放之時間點也會較晚。

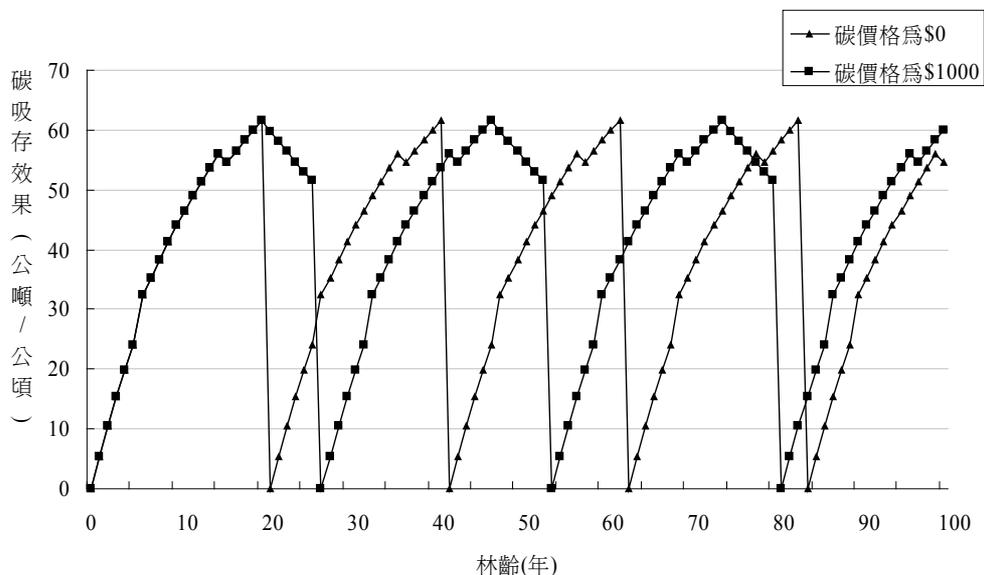


圖 3 有無存在碳價格下杉木之最適輪伐期與邊際碳吸存量

資料來源：本研究整理

在考慮木材價格隨林齡變動下之模擬分析結果如表 3 與圖 4。當不存在碳價格時，杉木之最適輪伐期為 20 年，且林地期望價值為每公頃 1,020,156.36 元，碳吸存量為 1,803.69 公噸；隨著碳價格增加，則最適輪伐期也會延長，碳吸存量也會增加。在碳價格增加為每公噸 200 元時，則林地期望價值將增加每公頃 1,385,329.51 元，最適輪伐期亦延長為 21 年，碳吸存量為 1,869.12 公噸，即每公頃土地因延長一年輪伐期將使得碳吸存量增加

65.43 公噸 (=1,869.12-1,803.69)。其次，若碳價格為每公噸 600 元時，最適輪伐期將增加為 23 年，林地期望價值也增加至每公頃 2,159,262.28 元，碳吸存量增加為 1,982.37 公噸，即每公頃土地因延長三年輪伐期將使得碳吸存量增加 178.68 公噸 (=1,982.37-1,803.69)。在碳價格為每公噸 1,400 元時，最適輪伐期增加至 28 年，林地期望價值也增加至每公頃 3,845,261.06 元，碳吸存量為 2,192.20 公噸，即每公頃土地因延長八年輪伐期將使得碳吸存量增加 388.51 公噸 (=2,192.20-1,803.69)。由碳價格與地主提供之碳吸存資料可繪成碳吸存之供給曲線，如圖 5。縱軸為碳吸存量，橫軸為碳價格，可得到碳吸存之供給曲線為 Y 軸正截距，且為正斜率偏平坦之曲線。

表 3 不同碳價格下杉木之最適輪伐期、林地期望價值以及碳吸存量效果

項 目	碳 價 格 (元/公噸)			
	0	200	400	600
最適輪伐期(年)	20	21	22	23
林地期望價值 (元/公頃)	1,020,156.36	1,385,329.51	1,765,634.71	2,159,262.28
林地期望價值之變動 比例(%)	-	35.80	27.45	22.29
碳吸存量* (公噸/公頃)	1,803.69	1,869.12	1,928.41	1,982.37
碳吸存量之變動比例 (%)	-	3.63	3.17	2.80
項 目	碳 價 格 (元/公噸)			
	800	1,000	1,200	1,400
最適輪伐期(年)	25	26	27	28
林地期望價值 (元/公頃)	2,565,489.04	2,982,925.33	3,409,782.02	3,845,261.06
林地期望價值之變動 比例(%)	18.81	16.27	14.31	12.77
碳吸存量* (公噸/公頃)	2,076.86	2,118.42	2,156.75	2,192.20
碳吸存量之變動比例 (%)	4.77	2.00	1.81	1.64

資料來源：本研究整理。

註：* 碳吸存量為將無窮個輪伐期下之碳吸存量加總，再分別予以折現而得之碳吸存量，公式如(5)式。

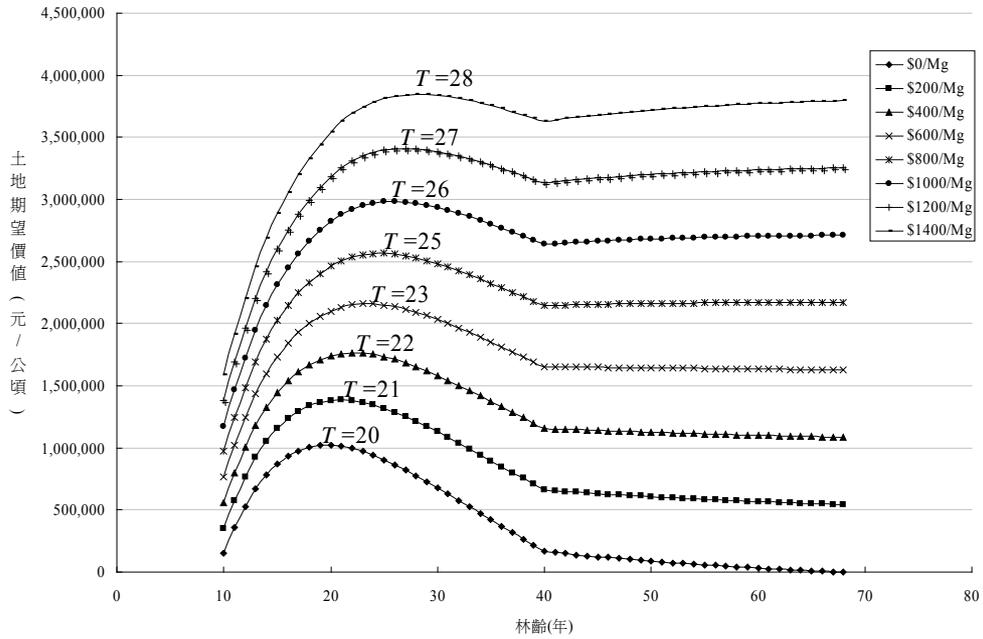


圖 4 考慮木材價格變動下不同碳價格對杉木最適輪伐期與林地期望價值之影響
資料來源：本研究整理

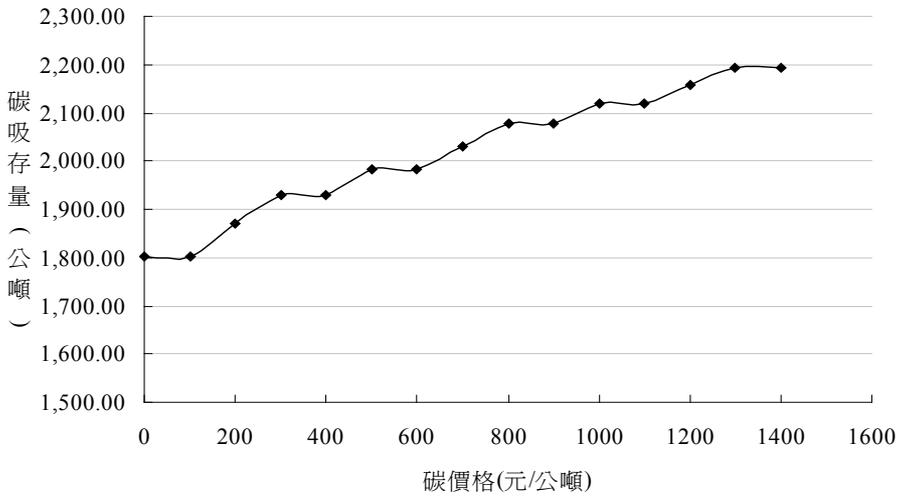


圖 5 杉木提供碳吸存之供給曲線

資料來源：本研究整理

根據本研究之模擬結果（註 20），對地主而言，當碳價格由每公噸 0 元提升至每公噸 200 元時，杉木每公頃林地期望價值之增加比例最高，為 35.80%，隨著碳價格增加，林地期望價值之增加比例呈遞減狀態；而以碳吸存量之變化量而言，在碳價格由每公噸 600 元提升至 800 元時，其邊際碳吸存量增加幅度最大，為 4.77%；碳價格由每公噸 1,200 元提升至 1,400 元時之碳吸存量增加比例最少，為 1.81%。另外碳價格越高，不同輪伐期下林地期望價值差異也越小，延緩伐木的損失也較小。

3.3.3 碳吸存之機會成本分析

對地主而言，存在碳價格除了使林地期望價值增加之外，也產生因增加碳吸存而造成的木材收益損失，可據此估算碳吸存之機會成本。當碳價格由每公噸 0 元增加至每公噸 200 元時，最適輪伐期將由 20 年增加至 21 年，而碳吸存量也由 1,803.69 公噸增加至 1,869.12 公噸。延長一年的輪伐期，碳吸存之總支出（註 21）為 373,824.22 元，碳吸存量增加 65.43 公噸，林地期望價值每公頃增加 365,173.15 元，故延緩伐期所產生的機會成本為每公頃 8,651.08 元（ $=373,824.22-365,173.15$ ），此為因延緩砍伐而對木材收益產生的減損金額，故碳吸存之邊際機會成本（額外增加一單位的碳吸存所需增加的機會成本）為每公噸 132.23 元。同樣的分析可知，當碳價格為每公噸 600 元時，其平均機會成本為每公噸 281.61 元，邊際機會成本為每公噸 452.77 元。由表 4 與圖 6 可知，平均機會成本與邊際機會成本隨著碳價格增加而遞增。因此，存在碳價格下，地主獲得的林地期望價值增加量恆小於政府（或碳排放廠商）所提供的碳價格支出，亦即碳價格支出並沒有全部由地主接收，因為地主必須負擔因延緩伐木所產生的木材收入減損。

表4 不同碳價格下杉木碳吸存量與碳吸存之機會成本

項 目	碳 價 格 (元/公噸)			
	0	200	400	600
最適輪伐期(年)	20	21	22	23
碳吸存量 ^a (公噸/公頃)	1,803.69	1,869.12	1,928.41	1,982.37
碳價格總支出 (元/公頃) ^b	0.00	373,824.22	771,365.71	1,189,424.65
林地期望價值之增加 (元/公頃)	-	365,173.15	380,305.21	393,627.57
碳吸存之機會成本 (元/公頃) ^c	-	8,651.08	25,887.35	50,318.73
平均機會成本 (元/公噸) ^d	-	132.23	207.56	281.61
邊際機會成本 (元/公噸) ^e	-	132.23	290.70	452.77

項 目	碳 價 格 (元/公噸)			
	800	1,000	1,200	1,400
最適輪伐期(年)	25	26	27	28
碳吸存量 ^a (公噸/公頃)	2,076.86	2,118.42	2,156.75	2,192.20
碳價格總支出 (元/公頃) ^b	1,661,486.56	2,118,416.73	2,588,098.28	3,069,080.13
林地期望價值之增加 (元/公頃)	406,226.76	417,436.29	426,856.69	435,479.04
碳吸存之機會成本 (元/公頃) ^c	116,153.87	155,647.75	198,472.61	243,975.44
平均機會成本 (元/公噸) ^d	425.22	494.56	562.16	627.98
邊際機會成本 (元/公噸) ^e	696.79	950.32	1,117.21	1,283.52

資料來源：本研究整理。

註：a 碳吸存量為考慮無窮期下之碳吸存量折現至第0時之值。

b 碳價格總支出為碳價格乘以碳吸存量，碳價格總支出將等於林地期望價值增加量與碳吸存機會成本的加總。

c 碳價格支出大於地主所增加的林地期望價值時，表示碳價格補償並沒有全部移轉至地主手中，因為地主必須自行負擔延緩伐木而導致木材收益之損失，此稱為存在碳價格下所產生的碳吸存機會成本。

d 碳吸存之機會成本除以有無碳價格下碳吸存量的差異。

e 碳吸存之機會成本除以每個碳價格間隔之碳吸存量的差異

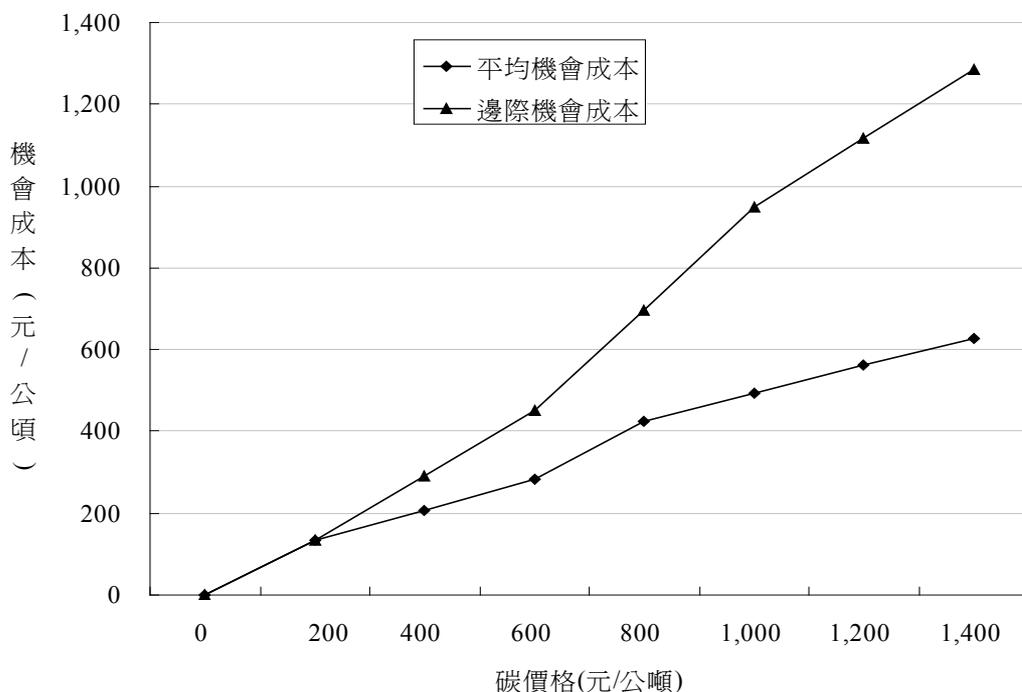


圖 6 不同碳價格下碳吸存之平均機會成本與邊際機會成本

資料來源：本研究整理

3.3.4 不同碳價格下已成林地之最適輪伐期與林地期望價值

若碳價格之給付對象僅針對新植造林，即新植造林地之地主才有碳價格之補償，此舉是否會增加已成林地提早砍伐之誘因，縮短已成林地之「第一個最適輪伐期」？以下本研究遵循前述相同變數估計與假設，以基準年時林齡為 5 年與林齡為 10 年之已成林地為例，模擬分析杉木之已成林地第一個輪伐期長度（註 22）。根據前述模型式可求得表 5 之模擬結果，由於林地地主在第二個輪伐期可獲得碳價格給付之收益，故已成林地地主將會縮短第一個輪伐期，以提早進入可獲得碳價格之第二個輪伐期階段。由表 5 可知，若不存在碳價格，基準年時林齡為 5 年之已成林地，求算出來的第一個最適輪

伐期為 20 年，且現存之林地期望價值為每公頃 1,368,923.75 元，此金額反應杉木造林之木材收益淨現值以及未來輪伐期之木材收益淨現值之加總。當存在碳價格為每公噸 200 元時，在基準年林齡為 5 年之林地，其第一個輪伐期為 18 年（小於 20 年），亦即會提早在 13 年後砍伐，以重新再造林造林進入可獲得碳價格給付之階段。而在每公噸 400 元時，其第一個輪伐期為 17 年（小於 20 年）。當碳價格增加至每公噸 600 元以上時，則地主之最適決策為立即砍伐已成林再重新造林，以獲得更多的收益。此隱含重要的政策意涵，即當碳價格為每公噸 600 元以上時，林齡為 5 年或以下之已成林地都可能被立即砍伐，而造成所謂砍大樹種小樹及森林效益減損的問題。

同樣地，對於基準年時林齡為 10 年之林地，其第一個輪伐期亦為 18 年（小於 20 年），亦即在 8 年後地主就會砍伐，再予以重新造林，以進入可獲得碳吸存補償之階段。在每公噸 400 元時，其第一個輪伐期為 17 年；在每公噸 600 元時，其第一個輪伐期為 15 年（小於 20 年）；當碳價格增加至每公噸 1,000 元以上時，則地主最適決策亦為立即砍伐已成林地，再重新造林，以提早進入可領取碳價格階段來提升林地期望價值。此亦隱含重要政策意涵，即當碳價格為每公噸 1,000 元以上時，所有林齡 10 年或以下之已成林地都可能會被立即砍伐。

由上述模擬分析可得，只要存在碳價格，且碳價格給付對象僅為新植造林地，則已成林地之地主將縮短林地之第一個輪伐期，造成許多低林齡之林地被砍伐，導致短時間內更多碳的釋放，以及減少森林所帶來的外部效益。換言之，只對新植造林提供碳價格給付將強化砍伐已成林之誘因，甚至造成地主之砍伐政策偏誤，此符合前人所提及碳價格提供相反方向（perverse）之經濟誘因（註 23）。

表 5 不同碳價格下基準年時杉木成林地之最適輪伐期與林地期望價值

項 目	碳 價 格 (元/公噸)			
	0	200	400	600
已成林地之林齡為 5 年				
第一個輪伐期 (年)	20	18	17	5
第二個輪伐期 (年)	20	21	22	23
已成林地之期望價值 (元/公頃)	1,368,923.75	1,611,364.24	1,873,436.34	2,166,955.39
已成林地之林齡為 10 年				
第一個輪伐期 (年)	20	18	17	15
第二個輪伐期 (年)	20	21	22	23
已成林地之期望價值 (元/公頃)	1,590,462.49	1,872,138.15	2,176,622.49	2,506,297.60
項 目	碳 價 格 (元/公噸)			
	800	1,000	1,200	1,400
已成林地之林齡為 5 年				
第一個輪伐期 (年)	5	5	5	5
第二個輪伐期 (年)	25	26	27	28
已成林地之期望價值 (元/公頃)	2,573,182.15	2,990,618.43	3,417,475.13	3,852,954.16
已成林地之林齡為 10 年				
第一個輪伐期 (年)	13	10	10	10
第二個輪伐期 (年)	25	26	27	28
已成林地之期望價值 (元/公頃)	3,270,036.15	3,270,036.15	3,696,892.84	4,132,371.87

資料來源：本研究整理。

IV、結論與建議

全球溫室氣體的增加趨勢以及其對全球氣候產生破壞之潛力受到國際重

視，並積極採取行動以減少溫室氣體之排放。根據京都議定書之規定，1990 年至 2008 年間的新植與更新造林才能計入碳排放之減量值中。倘若因此碳價格之給付對象僅針對這段期間的新植造林，則將對在 1990 年前種植之林木增加砍伐誘因，亦即在京都議定書規範下之碳價格給付可能使得已成林之地主提前砍伐。本研究主要模擬分析杉木在不同碳價格下，對於林主之最適輪伐期、林地期望價值、碳吸存量與碳吸存機會成本之影響，並分析碳價格之給付對裸露林地與已成林地最適輪伐期之影響。

根據本研究之實證結果，在木材單位價格固定下，提高碳價格給付將會使最適輪伐期拉長，林地期望價值增加。當木材單位價格為每立方公尺 2,500 元，碳價格由每公噸 0 元增加至每公噸 600 元時，杉木之最適輪伐期將由 18 年延長至 28 年，且林地期望價值將由每公頃 684,304.12 元增加至 1,853,456.89 元。碳價格在每公噸 600 元以下時，最適輪伐期之變動較小，當碳價格超過每公噸 600 元時，最適輪伐期之變動則較為顯著。在木材價格固定下，每單位碳價格越高，最適輪伐期將越長。當碳價格達一定水準以上時，在最適輪伐期附近時點之林地期望價值差異不大，因此最適輪伐期會趨於無窮大。另外，若碳價格固定，則隨著木材價格增加，最適輪伐期會縮短，林地期望價值會增加。當碳價格固定在每公噸 600 元，若木材價格由每立方公尺 2,000 元增加至每立方公尺 3,500 元時，則最適輪伐期將由 34 年縮短至 24 年，而林地期望價值由每公頃 1,709,509.31 元增加至每公頃 2,200,262.04 元。木材單位價格在每立方公尺 3,000 元以下時，最適輪伐期之變動較大，當木材單位價格超過每立方公尺 3,000 元時，最適輪伐期之變動較小。在碳價格固定下，木材價格越低，則最適輪伐期將越長。

在木材價格隨林齡變動之情況下，增加碳價格將延長最適輪伐期，碳總吸存量也較高。在碳價格為由每公噸 0 元增加至每公噸 600 元時，最適輪伐期將由 20 年增加為 23 年，林地期望價值也由每公頃 1,020,156.36 元增加為每公頃 2,159,262.28 元，碳吸存量由每公頃 1,803.69 公噸增加為每公頃

1,982.37 公噸，即每公頃土地因延長三年輪伐期，而使得碳吸存量增加 178.68 公噸。在碳價格為每公噸 1,400 元時，最適輪伐期將由 20 年增加為 28 年，林地期望價值也由每公頃 1,020,156.36 元增加至 3,845,261.06 元，碳吸存量由每公頃 1,803.69 公噸為 2,192.20 公噸，即每公頃土地因延長八年輪伐期而使得碳吸存量增加 388.51 公噸。

就裸露林地而言，當碳價格由每公噸 0 元增加至每公噸 200 元時，每公頃林地期望價值之增加比例最高（35.80%），隨著碳價格增加，林地期望價值之增加比例呈遞減狀態。若以碳吸存量之變化量而言，在碳價格由每公噸 600 元提升至 800 元時，其邊際碳吸存量之增加比例最大（增加 4.77%），以碳價格由每公噸 1,200 元提升至 1,400 元時之碳吸存量之增加比例最小（增加 1.81%）。根據本研究結果，碳價格越高，則不同輪伐期下之林地期望價值差異將越小，對地主而言，延緩伐木的損失也較小。

就碳吸存之機會成本而言，當碳價格由每公噸 0 元增加至每公噸 200 元時，最適輪伐期將由 20 年增加至 21 年，而碳吸存量也由 1,803.69 公噸增加至 1,869.12 公噸，延長一年的輪伐期將增加碳吸存量 65.43 公噸，每公頃林地期望價值亦增加 365,173.15 元，延緩伐期所產生的碳吸存機會成本為每公頃 8,651.08 元，此為延緩砍伐造成木材收益的減損金額。隨著碳價格增加，平均機會成本與邊際機會成本皆遞增。由於木材收益之損失由林地地主負擔，林地期望價值之增加量將恆小於政府或碳排放廠商所提供的碳價格支出。

就已成林地而言，若誘因機制僅對新植造林之碳吸存給予碳價格給付，將縮短已成林地之第一個最適輪伐期。例如當碳價格為每公噸 200 元時，對於基準年時林齡為 10 年之林地，第一個輪伐期將由 20 年縮短至 18 年，即在 8 年後地主就會砍伐，再予以重新造林以進入可獲得碳價格之階段；若碳價格在每公噸 1,000 元以上，則林地地主之最適決策為立即砍伐，以提升林地期望價值；換言之，若碳價格為每公噸 1,000 元時，則林齡為 10 年或以

下之已成林皆會被立即砍伐重新造林，使得短時間內造成更多碳的釋放，減少森林所帶來的外部效益。

由上述研究結果可知，若未來所建立之誘因制度僅對新植造林之碳吸存進行給付，則所有已成林地皆會受到影響，已成林地主會提早砍伐，以提早進入領取碳價格給付之階段。對於較低林齡之已成林地而言，林地地主將可能立即砍伐再重新造林。若林地地主在砍伐時需支付碳價格，則提早砍伐已成林之現象將會減緩，但仍會提早砍伐。若政府同時對新植造林與已成林之碳吸存提供碳價格給付，也可減輕已成林地提早砍伐的問題，其減輕程度則視對已成林之給付水準而定。

目前我國正處於研擬碳減量策略與措施之階段，有必要對可能的政策措施作評估。在各種政策措施與策略中，森林必然扮演重要之角色，而對森林所提供的碳吸存貢獻給予碳價格給付為一重要的政策方向。本研究模擬分析此政策措施的可能結果，發現若所建立的誘因機制僅對新植造林作給付，則可能會造成已成林地的立即砍伐與提前砍伐，而對生態環境造成不利的影響，因此政府在設計此制度時必須瞭解已成林地可能受到的影響，並研擬配套措施以減輕可能產生的不利影響。可能的配套措施包括對已成林地之碳吸存貢獻也給予碳價格給付，以及對已成林地地主在砍伐已成林時課徵砍伐稅。然而，無論是對已成林給予碳價格給付或是對已成林課徵砍伐稅都是一種新的政策構思，所牽涉的面積廣，影響的層面大，政策的複雜度高，需要更縝密的評估與溝通。政府應重視建立碳價格給付制度的相關問題，在研擬碳減量之相關政策時應會考量可能達成的副作用，以降低碳價格給付可能產生的負面效果，包括提早砍伐已成林地，使森林覆蓋在短時間內顯著減少，碳釋放增加，以及土壤流失之負面效果。

附 註

1. FCCC 締約國於 1996 年 7 月在瑞士日內瓦舉行第二次締約國會議，決議於 1997 年 12 月在日本京都舉行會議，訂定具有法律效力之溫室氣體減量議定書。美國及其他三十七個工業國家於 1997 年 12 月在日本京都舉行 FCCC 第三次締約國會議，通過具有約束力的京都議定書，規範工業國家溫室氣體之減量責任，於 2012 年將溫室氣體排放量減至 1990 年排放量的 95%。參加聯合國氣候高峰會議的一百六十個國家代表於 1998 年 11 月共同發佈「布宜諾斯艾利斯行動方案」，列出執行 1997 年京都議定書的詳細策略。此方案內容包括對未達成減量目標之國家的懲罰方式、如何將適宜當地氣候的科技設備轉移到開發中國家，及如何測量溫室氣體等。
2. 京都議定書允許透過市場機制來減少溫室氣體減量成本，此機制包括排放交易（Emission Trading，以下簡稱 ET）、跨國聯合執行（Joint Implementation，以下簡稱 JI）、與清潔發展機制（Clean Development Mechanism，以下簡稱 CDM）等。在特定環境品質條件下，京都議定書對溫室氣體排放總量訂定上限，不同經濟個體可透過市場機制進行排放權交易，而交易工具可以價格直接交易，或透過技術移轉等。關於京都議定書的詳細內容分析，可參考林國慶（2005、2006）之內容。
3. 如美國的林地大部分為私有林。
4. 根據 Hardie 與 Parks（1991）指出，成本分擔措施與技術指導之提供對於私有地主之造林決策有顯著的正面影響。該文也進行技術指導之提供與成本分擔措施進行交叉效果之分析，結果顯示成本分擔措施之效果顯著高於技術指導之提供。Cubbage（2003）提出政府執行公共政策獲釋提供技術指導將會提升林主之造林收益以及提升林地管理之品質。另外亦有許多文獻分析造林計畫的參與行為，主要探討對象以成本分擔措施為主。例如 English *et al.*（1997）發現，所得越高以及成本越低將會提升參與造林之機率；Nagubadi *et al.*（1996）提出年紀越大、土地面積越大皆會提升參與造林之機率；Stevens *et al.*（1999）則提出年紀越大將會減少參與造林之機率，但是所得高會提升造林之機率；Megalos（2000）以及 Lorenzo 與 Beard（1996）則提出土地面積較大以及職業為非農民者參與造林之機率較高。Esseks 與 Moulton（2000）對於私有地主（NIPF）參加 Forest Stewardship Program（以下簡稱 FSP）以及 Stewardship Incentives Program（以下簡稱 SIP）進行調查，這兩種政策均自 1990 年開始執行，至 2002 年開始由農場基金（Farm Bill）支應直到現在（2007 年），列為林地維護之系列政策（Forest

Land Enhancement Program) 之中的政策, 此系列的政策包括農地造林 (afforestation)、再植造林 (reforestation)、林地管理 (forest improvement)、林地管理計畫 (forest stewardship plans)、混農林政策 (agroforestry policy)、土壤與水品質維護 (soil and water quality) 以及濕地維護 (wetlands) 等。相關研究指出政府採用提供獎勵金方式吸引許多地主參與造林之效果非常顯著。

5. 大規模的採伐與森林破壞是造成森林二氧化碳釋放的最大原因 (李國忠、林俊成, 2000)。Marland 與 Marland (1992) 指出, 大規模的立地、成熟林木和低生產力林地, 要回歸到原來的碳吸存狀況要很多年, 伐木將造成林地破壞。因為林地破壞將改變土地利用的方式, 造成森林生產力的降低與生物量的減少、微氣候的改變, 使森林的擾動頻率增加, 如森林火災、林地裸露, 土壤流失與退化, 使森林林木及土壤中所貯存的有機碳快速流失, 使森林吸存二氧化碳的功能減弱。
6. 最適輪伐期之相關探討可參閱 Faustmann (1849) 與鄭欽龍 (1994) 等。
7. 本研究修正造林成本為隨時間改變而改變, 使得模型較具彈性與一般化, 木材價格隨時間改變而改變也較符合現實情況, 此外本研究考慮台灣之現況, 假設碳價格僅對於種植林木之地主給予支付, 而在地主砍伐時不需要支付, 較符合台灣情況, 即在地主種植林木時發放碳價格給付, 而在地主獎勵期限屆滿時不需歸還碳價格之 payment。
8. 修正造林成本為隨時間改變而改變, 使得模型較具彈性與一般化; 木材價格隨時間改變而改變也較符合現實情況; 此外在本研究之實證模型當中, 考慮台灣之現況, 進一步假設碳價格僅對於種植林木之地主給予支付, 而在地主砍伐時不需要支付, 即在地主種植林木時發放碳價格給付, 而在地主獎勵期限屆滿時不需歸還碳價格給付, 除較符合台灣狀況外, 也可解釋成砍伐後碳吸存沒有釋放至大氣, 而儲存在木材中 (例如製造成家具等); 此三種修正假設對於量的結果確實有影響, 對於質的分析結果則較無太大的影響。但就實證過程而言, 修正過之模型所需要之資料較多, 但對於以台灣作為研究對象來進行社會科學之分析而言, 修正之模型確實較符合經濟現象且反應真實現況。
9. 第三節的實證分析中, 本研究也會針對這部分來進行分析。
10. 相關內容可參考 Murray (2000、2003)。
11. 給付基準年意即開始進行碳價格給付之年份, 以下均稱之為基準年。
12. 杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 並不是國內林地所佔比例最大的樹種, 但為台灣私有林地中造林面積最大且最主要之樹種 (國有林之造林則主要以柳杉與臺灣杉為主), 亦是台灣私有林地中主要之造林樹種, 也是國內產材交易量最大的樹種, 亦屬於目前全民造林政策與平地造林政策之獎勵樹種之一, 加上本研究主要探討碳價格之存在對於輪伐期與碳吸存量之影響, 且杉木之各林齡之碳吸存量資料較為完整, 以及杉木為台灣森林主產物生產量最大之樹種, 根據 2005 年之林

業統計資料而言，杉木佔總主產物生產量之 46.89%以上，故本研究將杉木作為研究模擬對象。因此本研究以杉木樹種為例，分析在不同碳價格下，對最適輪伐期、林地期望價值以及總碳吸存量之效果。本研究最好的分析方式是同時比較各種造林樹種的分析結果，並考量混種的方式，以求政策選擇上的多元化，只是礙於台灣林業相關資料不足，尤其原木價格與林齡的關係、以及造林成本等之資料非常匱乏，故僅考慮單一樹種杉木為例，此為本研究之限制。

13. 木材單位價格一般是指市場的交易價格，國內木材的交易價格資料主要是由林務局發行的台灣林業刊物所刊載。然而其所提供的資料大部分是根據林務局標售木材的價格資料，以及貿易商進口木材報價資料所彙整而成（劉浚明，1997），因此通常只有原木或木材之市場交易價格，並沒有各齡級之原木價格，故建立原木價格與林齡關係之函數十分不易。立木材積（供林木收穫計算用）與用材材積（市場上用）在單一樹種或單一面積林木產量皆不同，且桿材（20 年生以下）兩種材積因形數及市場規格關係差異大，如此皆會影響材價之計算之真實性。
14. 此迴歸式之 R^2 值為 99.88%，而修正後的 R^2 值亦高達 99.82%， t 與 t^2 迴歸係數之 t 檢定值分別為 17.66 與 -10.84，均達到 α 為 1% 之顯著水準，而 Durbin-Watson 值為 1.75，由於樣本數為 7 個，故無法判斷是否具有一階自我相關，若以樣本數 15 個觀之，不具一階自我相關。
15. 由於在此迴歸式中，當 $t > 23$ 之後， $p(t)$ 開始遞減，基於保守估計以及避免負值發生，本研究假設原木價格在林齡 40 年之後皆維持在第 40 年的價格水準，以更符合實際狀況。另外由於陳麗琴與黃進睦（1992）所估計的原木價值為 1991 年的價格，故吾人必須考慮原木價格上漲率，由林務局編印之行政院農業委員會林務局（2005）可知從 1991 年至 2003 年之杉木之原木價格名目上漲率為 8%，因此本文將由迴歸式所計算出來各林齡之價格乘以 1.08 來估計 2007 年之原木價格，並以此成長率來估算每年之價格成長率（此為名目價格上漲率），進一步推估未來之原木價格。
16. 關於造林成本與撫育管理費用之假設係採用劉浚明（1997）之假設。
17. 本研究並未預期其碳吸存函數型態為線性模式，然 R^2 值高達 99.75%，而修正後的 R^2 值亦高達 93.87%，迴歸係數之 t 檢定值為 83.93，達到 1% 之顯著水準，而 Durbin-Watson 值為 0.1577。因此以線性迴歸方式來解釋杉木之林齡與二氧化碳碳吸存量之關係，應屬合理。在本研究所建立碳吸存效益函數之迴歸式中，當 $C(t)$ 會隨著 t 增加而增加，基於保守估計原則，本研究假設 20 年之後每年的邊際碳吸存效益維持在 20 年的水準。值得一提的是，本研究依照 Murray（2003）之作法，碳吸存函數有經折現之運算，故碳吸存函數為 S 型函數，與木材材積函數一致。
18. 此不同碳價格與不同木材單位價格之敏感度分析中，均假設木材價格不隨林齡而

變動；待下一節才進一步放寬此假設。一般情形而言（正常的木材價格與正常的碳價格），永遠不砍伐林木當然不是地主之最佳決策。但當木材價格維持固定，碳價格很高時，則地主領取碳給付之期限越長越好（因為隨時砍伐之木材收入固定），因此地主傾向延長砍伐而可能導致輪伐期無窮大；另一方面當碳價格固定，而木材價格很低時，則地主造林之目的乃是為了碳價格收入，故亦傾向延長輪伐期。因此當碳價格很高或是木材價格很低時，皆可能導致地主永遠不砍伐；其實證模擬之結果與本研究模擬之碳吸存函數、原木材積函數之形式設定有關。

19. 由理論模型可看出提高碳價格給付將拉長最適輪伐期。本研究主要對於此模型進行模擬，以台灣種植杉木為例，研究當碳價格存在時（例如政府若提供碳價格之給付）則地主會延長多久的輪伐期，瞭解輪伐期延長多久，將可進一步得知碳吸存量之增加量，進而對政策研擬有所幫助，故相關之實證模擬仍為必要。
20. 不同的碳吸存函數設定，將會有不同的模擬結果，因此如果碳吸存量較小，則傾向提早砍伐。如果碳吸存量較大，則有可能地主會延後砍伐。不同樹種具有不同的碳吸存曲線，而即使同一樹種在不同的實驗區，亦可能因土壤與地理環境產生不同的碳吸存函數結果。故不同的模擬對象與變數估計皆有不同之模擬結果，此為本研究之限制。
21. 本研究之「碳價格」並沒有限制為何種方式訂定，可能為政府的補貼或課稅，亦可為碳交易市場之碳價格。而「碳價格之總支出」為考慮無窮個輪伐期下之碳吸存量乘以碳價格而得。
22. 已成林地之第二個以後的輪伐期將等於裸露林地之輪伐期長度，故計算方式不再贅述。
23. 台灣實施之全民造林政策自 1997 年 8 月開始實施，主要是對於林地造林提供造林獎勵金，其額度為 20 年每公頃可領 53 萬元，然獎勵對象僅針對再植造林或新植造林之土地，因此政策實施期間，台灣之環保團體對於全民造林政策之「獎勵新植造林」頗有異議，質疑全民造林政策將產生林農砍大樹種小樹的嚴重問題，進而嚴重破壞生態，認為山地自然會種樹，不需要大規模人為造林。致使全民造林政策執行至 2005 年中止。應用至本研究之分析，全民造林政策之造林獎勵金可視為是一種碳價格給付，而碳價格額度由政府所決定，因此如果政府沒有對於參加之林地利用方式做全面的清查，則根據本研究之模擬分析結果，只要存在碳價格（即造林獎勵金），地主勢必會縮短輪伐期以期能提早領取碳價格之補償；而若碳價格高到一定的水準，則對於地主而言，最佳決策為立即砍伐再重新造林。我國林產價格低迷，若碳價格（即造林獎勵金）相當誘人，對於已成林地而言，「砍大樹種小樹」的行為是林地地主合理之行為，亦是符合經濟邏輯的。

參考文獻

- 行政院農業委員會林務局，2005。『林業統計』。台北：行政院農業委員會林務局。
- 李國忠、林俊成，2000。「森林營造與大氣碳吸存」，『現代育林』。16卷，1期，10-14。
- 林俊成、鄭美如、劉淑芬、李國忠，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。
- 林國慶，2005。「京都議定書與平地景觀造林政策之研究」。行政院農業委員會林務局委託研究計畫。94-00-5-01。國立台灣大學農業經濟研究所。
- 林國慶，2006。「因應國際溫室氣體減量台灣森林資源經營管理政策之調整」。行政院農業委員會委託研究計畫。95農科-12.2.3-務-e。國立台灣大學農業經濟研究所。
- 陳麗琴，1987。「杉木原木最適材之經濟分析」，『林業試驗所研究報告季刊』。2卷，3期，227-240。
- 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。
- 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。
- 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。
- 鄭欽龍，1994。「森林資源利用與永續性-森林最適輪伐期之探討」，『中華林學季刊』。27卷，4期，63-74。
- Appels, D. C., 2001. "Forest Rotation Lengths under Carbon Sequestration Payments," Paper presented at the Conference of Economists. University of Western Australia, Perth, September 24.
- Chladna, Z., 2007. "Determination of Optimal Rotation Period under Stochastic Wood and Carbon Prices," *Forest Policy and Economics*. 9(8): 1031-1045.
- Clinton, W. J. and A. Gore, 1993. "The climate change action plan," *White House Office of*

- Environment Policy*. 2(1): 35-49.
- Cubbage, F. W., 2003. "The Value of Foresters," *Forest Landowner*. 62(1): 16-19.
- Davis, L. S. and K. N. Johnson, ed. 1987. *Forest Management*, 3th. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Dixon, R. K., K. J. Andrasko, F. G. Sussman, M. A. Lavinson, M. C. Trexler, and T. S. Vinson, 1993. "Forest Sector Carbon Offset Projects: Near-Term Opportunities to Mitigate Greenhouse Gas Emissions," *Water, Air, and Soil Pollution*. 70: 561-577.
- English, B. C., C. D. Bell, G. R. Wells, and R. K. Roberts, 1997. "Stewardship Incentives in Forestry: Participation Factors in Tennessee," *The Southern Journal of Applied Forestry*. 21(1): 5-10.
- Esseks, J. D. and R. J. Moulton, 2000. "Evaluating the Forest Stewardship Program Through a National Survey of Participating Forestland Owners," *The Center for Governmental Studies, Social Science Research Institute*. pp. 1-113. Center for Governmental Studies of Northern Illinois University.
- Faustmann, M., 1849. "Calculation of the Value Which Forestland and Immature Stands Possess for Forestry," Reprinted in 1995 *Journal of Forest Economics*. 1(1): 7-44.
- Fearnside, P., 1995. "Global Warming Response Options in Brazil's Forest Sector: Comparison of Project-Level Costs and Benefits," *Biomass and Bioenergy*. 8: 309-322.
- Hardie, I. W. and P. J. Parks, 1991. "Individual Choice and Regional Acreage Response to Cost-Sharing in the South, 1971-1981," *Forest Science*. 37(1): 175-190.
- Hartman, R., 1976. "The Harvesting Decision when a Standing Forest has Value," *Economic Inquiry*. 14: 52-58.
- Hoen, H. F., 1994. "The Faustmann Rotation in the Presence of a Positive CO₂-Price," *The Scandinavian Journal of Economics*. 35: 278-288.
- Hoen, H. F. and B. Solberg, 1997. "Carbon Dioxide Taxing, Timber Rotations, and Market Implications," *Economics of Carbon Sequestration in Forestry*. Edited by R. A. Sedjo, R. M. Sampson, and J. Wisniewski. New York: CRC.
- Lorenzo, A. B. and P. Beard, 1996. "Factors Affecting the Decisions of NIPF Owners to Use Assistance Programs," *Nonindustrial Private Forests: Learning from the Past, Prospects*

- for the Future*. pp. 264-275. Minnesota Extension Service, University of Minnesota, St. Paul, MN.
- Marland, G. and B. Schlamadinger, 1999. "The Kyoto Protocol Could Make a Difference for the Optimal Forest-Based CO₂ Mitigation Strategy: Some Results from GORCAM," *Environmental Science and Policy*. 2(2): 111-124.
- Marland, G. and S. Marland, 1992, "Should We Store Carbon in Trees?" *Water, Air, and Soil Pollution*. 64: 181-195.
- Marland, G., B. Schlamadinger, and P. Leiby, 1997. "Forest/Biomass Based Mitigation Strategies –Does the Timing of Carbon Reductions Matter," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 27: 213-226.
- Megalos, M. A., 2000. "North Carolina Landowner Responsiveness to Forestry Incentives," Ph.D. Dissertation, North Carolina State University.
- Murray B. C., 2000. "Carbon Values, Reforestation, and Perverse Incentives under the Kyoto Protocol: An Empirical Analysis," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 5(3): 271-295.
- Murray B. C., 2003. "Economics of Forest Carbon Sequestration," *Forests in a Market Economy*. Kluwer Academic Publishers, 221-238.
- Nagubadi, V., K. T. McNamara, W. L. Hoover, and W. L. Miller, 1996. "Program Participation Behavior of Nonindustrial Forest Landowners: A Probit Analysis," *Journal of Agricultural and Applied Economics*. 28(2): 323-336.
- Price, C. and R. Willis, 1993. "Time, Discounting and the Valuation of Forestry's Carbon Fluxes," *Commonwealth Forestry Review*. 72(4): 265-271.
- Romero, C., V. Ros, and L. Daz-Balteiro, 1998. "Optimal Forest Rotation Age When Carbon Capture is Considered: Theory and Applications," *Journal of Operational Research Society*. 49: 121-131.
- Sampson, R. N. and R. A. Sedjo, 1997. "Economics of Carbon Sequestration in Forestry: an Overview," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 27: 1-8.
- Schlamadinger, B. and G. Marland, 1998. "The Kyoto Protocol: Provisions and Unresolved Issues Relevant to Land-Use Change and Forestry," *Environmental Science and Policy*. 1:

313-327.

- Solberg, B., 1997. "The Interface Between Research and Policy Making in Forestry: Needs and Improvement Possibilities," Paper Presented at Eleventh World Forestry Congress. 13-22 October, Antalya, Turkey. October 13-22.
- Stevens, T. H., D. Dennis, D. Kittredge, and M. Rickenbach, 1999. "Attitudes and Preferences Toward Co-Operative Agreements for Management of Private Forestlands in the Northeastern United States," *Journal of Environment Management*. 55(2): 81-90.
- Van Kooten, C. G., C. S. Binkley, and G. Delcourt, 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.
- Watson, R. T., I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo, and D. J. Dokken, 2000. *Land Use, Land Use Change, and Forestry 2000: Summary for Policymakers*. IPCC, Geneva, Switzerland.

An Analysis of Optimal Rotation and Expected Land Values under Carbon Pricing in Taiwan

Kuo-Ching Lin* and Wan-Yu Liu**

*Economic incentives for sequestering atmospheric carbon dioxide (CO₂) in forests may be an effective way to meet greenhouse gas reduction commitments under the Kyoto Protocol. Based on the model developed by Hoen (1994) and Murray (2003), this paper combines an analytical model of the optimal forest rotation with both timber and carbon as priced outputs. A simulation is conducted by using *cunninghania lanceolata* as an example to determine the optimal forest rotation, the amount of carbon stock, and forest land values. It is found that for the bare forest land the carbon prices of \$1,400 per metric ton – the highest price evaluated– can considerably lengthen forest rotations from 20 to 28 years, raise the forest land values to the level of \$3,845,261.01 per hectare, and increase the amount of carbon sequestered up to 2,192.20 metric tons per hectare, relative to the base case of no carbon compensation. If the carbon payments are only made for the regenerated stand only, it will create an incentive for the forest owners to harvest the existing forest earlier. When the level of payment is high enough, the forest owners might harvest the existing forest immediately after the enforcement of the carbon payment. Based on our simulation results, it is optimal for forest owners to immediately harvest an 5-year-old stand and 10-year-old stand at carbon prices as low as \$600 and \$1,000 per metric ton, respectively. If carbon compensation were extended to existing stands, the incentives for prematurely harvesting existing stands would be lessened.*

Keywords: Carbon Sequestration, Optimal Forest Rotation, Carbon Price, Forestry Policy

* Professor, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University.

** Ph. D. student, Department of Agriculture Economics, National Taiwan University.