

考慮機會成本下碳吸存成本效益 之經濟分析

林俊成*、柳婉郁**

摘要

爲因應溫室氣體排放量增加所造成對人類社會之不利影響，近年來世界各國均積極採取各種方式來降低溫室氣體之排放量，其中增加森林碳吸存被視爲是成本較低的減量策略。森林碳匯爲京都議定書中減緩氣候變化機制之一，在京都議定書中第 3.3 條及第 3.4 條均提到造林與森林管理活動產生之碳吸存均可併入排放減量值。因此，造林之碳吸存量與碳吸存成本效益分析乃爲目前攸關政策擬定之研究議題。本研究以蓮華池研究中心之杉木人工林爲例，分析杉木造林之碳吸存成本與效益。本研究發現前人文獻並未將木材收益列入碳吸存之機會成本一部份，因此可能產生低估造林碳吸存成本之情形。根據本研究之實證模擬，其主要結果顯示，在考慮碳吸存之機會成本後，20 年生之杉木人工林，其每公頃碳吸存量爲 54.22 噸，碳吸存效益現值爲每公頃 54,154.85 元，木材收益現值爲每公頃 225,931.69 元，累積碳吸存成本爲每公頃 226,808.69 元，單位碳吸存成本爲每噸 4,183.28 元。在考慮碳吸存之機會成本後，則平均單位碳吸存成本在 2,253.78 元至 2,866.42 元之間，爲求嚴謹，本研究另考慮三種碳釋放比率來計算單位碳吸存成本，估計結果爲在離散價格函數設定下，每噸碳吸存成本介於 362 元至 3,279.25 元之間，在連續價格函數設定下，每噸碳吸存成本介於 898.20 元至 5,309.86 元之間本研究之估算結果與國外文獻計算的碳吸存成本大致相符。

關鍵詞：京都議定書、碳吸存、成本效益、機會成本

JEL 分類代號：Q15, Q23, Q28

* 行政院農業委員會林業試驗所太麻里研究中心副研究員兼主任。

** 真理大學自然資源應用學系助理教授，本文聯繫作者。電話：0914043000，傳真：06-5703834，Email：nellyliu@gmail.com。

考慮機會成本下碳吸存成本效益 之經濟分析

林俊成、柳婉郁

壹、緒論

京都議定書 (Kyoto Protocol) 於 2005 年 2 月 16 日起生效，正式成為國際上各國減碳所需依循的實質環保規範，對於如何降低氣候變化危害的任務上，邁入一個新的階段。京都議定書中，規定 1990 年以後所進行之新植造林 (afforestation) 及更新造林 (reforestation) 扣除毀林 (deforestation) 損失排放所得之二氧化碳吸收或排放淨值，可併入該國之排放減量值計算，而加強森林管理 (forest management) 所額外增加的碳吸存量也可併入排放減量值。因此，加強造林與促進森林永續經營策略之環境適應 (adaptation) 方法，為二氧化碳減量的適當策略之一。近年來國內林業部門所推行的造林獎勵政策，如獎勵造林、全民造林及平地景觀造林，確可增加森林造林面積及碳吸存量 (林國慶與柳婉郁，2005，2007a，2007b)。根據林俊成等 (2002) 評估全民造林運動前三年造林面積 18,174 公頃的碳吸存潛力，預估 20 年後，約可吸存約 1.25 百萬噸的碳量。另一方面在臺灣有限的土地及以國土保安為主要經營目標的林業政策導向下，林地更新的比例極低，欲尋適當林地來進行造林工作是有其困難，根據林務局的林業統計資料，1990 年至 2005 年的平均每年造林面積僅為 5,265 公頃 (行政院農業委員會林務局，2007)。因此欲提高人工林經營效率及更新造林面積，可由強化私人營林的經營效率著手。就土地所有權而言，台灣地區私有林面積約 18.5 萬公頃，如再加上租地造林及原住民保留地宜林地面積，則林地由私人經營的總面積 50.7 萬公頃，占森林面積的 24.1% (羅凱安，1996)。

這些林地經營上面臨種種不利經營條件（勞動力不足及老化、工資高漲及材價低落）下，長期經營意願低落及效率偏低，如改變土地利用方式或加以荒廢，將對環境產生不利影響。政府雖有提供一些獎勵輔導措施，但由前人研究成果來看，普遍認為效果有限（林俊成，1994；汪大雄等，1994；任憶安與林俊成，1997；柳婉郁，2004）。因此在因應二氧化碳減量的國際趨勢下，需要二氧化碳排放減量額度的廠商，可藉由資金援助給私有林主從事造林或森林管理活動，私有林主也可將造林或森林管理活動所得到二氧化碳量，提供給廠商做為抵減量，藉由此種方式也可有效提高私有林的經營效率，此為多贏的局面。但欲鼓勵林主私人營林來提供碳吸存量，則必須提供一個可接受的報酬率及經濟誘因才較為可行（Robertson et al., 2004；林國慶與柳婉郁，2006a, 2006b；柳婉郁，2008）。

有關造林碳吸存成本效益方面的研究，聯合國氣候變化政府間專家委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）（2001）推估碳吸存成本則為每噸 0.1 美元至 100 美元，Moulton and Richards（1990）推估美國人工林每年可吸存 6.3 億噸的碳，其每噸的碳吸存成本為 9 美元至 41 美元，而 Adams et al.（1993）則估計其每噸碳吸存成本為 20 美元至 61 美元，但 Callaway and McCarl（1996）則推估美國人工林每年可吸存 2.8 億噸的碳，其每噸的碳吸存成本 17.36 美元，Richards and Stokes（2004）分析美國每年約可吸存 2.5 億噸至 5 億噸，其每噸碳的成本在 10 美元至 150 美元間，van Kooten et al.（1992）推估在加拿大平均每噸的碳吸存成本為 6 美元至 18 美元，中國每噸碳吸存成本則低於 2 美元（Xu, 1995），阿根廷則在每噸 20 美元（Sedjo, 1999），可見在不同研究中計算出之碳吸存成本差異很大。van Kooten et al.（2004）使用整合迴歸（meta-regression）分析 55 個研究的 981 筆森林碳吸存成本資料，結果顯示：經由森林保育的每噸碳成本為 46.62 美元至 260.29 美元，採用重新造林與農地造林活動所產生之碳吸存成本在前述之兩倍以上，而採用林產品碳貯存及生質能的碳替代之碳成本最低，其每噸碳成本為 12.52 美元至 68.44 美元，若考慮林地的機會成本，每噸碳成本高達 116.76 美元至 1,406.60 美元。在國內的研究方面，林俊成等（1999）分析結果顯示，柳杉人工林貯存二氧化碳成本每噸為 269 元。李國忠等（2000）初步估算當林齡生 30 年生之台灣杉人工林之碳吸存成本，每

噸為 448 元至 2,509 元。林俊成等 (2002) 評估全民造林運動，造林至 20 年時，每噸二氧化碳吸存成本為 1,367 元。

在過去文獻中，在計算造林成本時，大多以造林初始成本、造林經營管理成本，再加上其他用途之收入作為機會成本為計算基準，然而以碳吸存角度而言，造林之機會成本，除了林地其他用途收益外，應含有「不可將杉木任意砍伐出售收入」之損失，此為大多文獻所忽略的，因此，本研究將不可將杉木任意砍伐出售收入之損失列入碳吸存之成本來計算造林之碳吸存成本；進一步本研究以蓮華池杉木人工林之生長與成本資料¹為研究對象，藉由碳吸存量評估模式，分析杉木²不同林齡之碳吸存量、探討杉木造林之碳吸存成本與效益、分析考慮碳吸存之機會成本後之累積與單位碳吸存成本等，透過本研究之研究成果，期能作為政府未來施行各項造林減碳政策之參考。

本研究分成四節，第一節為緒論，第二節為碳吸存成本效益之理論模型，第三節碳吸存成本效益之實證結果與分析，第四節為結論與建議。

貳、碳吸存成本效益之理論模型

一、碳吸存效益之估算模式

一般推估林木每公頃碳吸存量，係根據 IPCC 估算林業部門碳吸存量之原則，將林木

¹ 此為林業試驗所蓮華池研究中心轄區杉木人工林之生長與成本資料 (1977 年至 1984 年)。

² 杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) 為早期為台灣地區人工林主要的栽植樹種之一，從 1971 年至 1992 年，台灣地區杉木總造林面積達 26,756.19 公頃，平均每年造林面積為 1,216.19 公頃 (林俊秀等，1993)。之後，每年的造林面積則呈逐年遞減。依據第三次台灣森林資源及土地利用調查 (行政院農業委員會林務局，1995)，在國有林事業區人工林中，杉木人工林面積約 20,800 公頃，約占台灣地區人工林總面積的 7%。

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吸存量，其林木碳吸存評估模式如下 (IPCC, 2003)：

$$S(t) = (V(t) \times D \times BEF) \times (1+R) \times CF \quad (1)$$

由 (1) 式，其中 $S(t)$ 為 t 時之林木累積碳量 (噸/公頃)； $V(t)$ 為 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。

其次，碳吸存效益貨幣化，可採用氣候變遷衝擊的防避成本 (如海平面上升及農業生產減少)、減少碳排放的成本 (如造林成本)、排放費用 (如碳稅) 來推估。本研究透過 (2) 式來評估碳吸存之貨幣效益：

$$B(t) = b(t) \times S(t) = b(t) \times [(V(t) \times D \times BEF) \times (1+R) \times CF] \quad (2)$$

根據 (2) 式， $B(t)$ 為 t 時之累積碳效益值， $b(t)$ 為 t 時之單位碳效益值 (元/噸)， $S(t)$ 為 t 時之林木累積碳量 (噸/公頃)， $V(t)$ 為 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。

二、碳吸存成本之估算模式

早期有關造林碳吸存成本方面的研究，大都以造林行為花費的成本多寡來做為碳吸存的替代成本，但由前人研究結果可知，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吸存成本。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，而非碳吸存，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，表示所吸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

碳吸存的產出，就需付出額外的成本 (Huang et al., 2004)，在估算碳吸存成本時，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，碳吸存量將全部釋放³，在此前提下，則維持碳吸存量的同時，即表示林主亦犧牲林木砍伐之收入，故碳吸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吸存成本，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 (3) 式⁴：

$$C(T) = C_i(0) + \int_0^T C_m(t) e^{-rt} dt + \int_0^T C_o(t) e^{-rt} dt + (P(T) - H(T))V(T) e^{-rT} \quad (3)$$

根據 (3) 式， r 為折現率， $C(T)$ 為第 T 年之碳吸存成本 (元/公頃)， $C_i(0)$ 為第 0 年時所投入之初始造林成本 (元/公頃)， $C_m(t)$ 為第 t 年之林地經營成本 (元/公頃)， $C_o(t)$ 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)，第 T 年之林木材積 (立方公尺/公頃)。因此 $\int_0^T C_m(t) e^{-rt} dt$ 為林地經營成本現值(元/公頃)， $(P(T) - H(T))V(T) e^{-rT}$ 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吸存之成本一部份，因此可能產生低估造林碳吸存成本之情形，由(3)式，碳吸存的成本除了造林成本之外，尚包含兩部分，包括林地作為

³ 一般而言，林木生長期間會捕捉 (吸存) 大氣中的二氧化碳，持續貯存於林木某部位，直到伐木後，部分吸存的碳會陸續釋放回大氣。如果在伐木後，部分木材被用來作為燃料，則所貯存的碳會釋放回大氣中，其他則隨木結構製品繼續被貯存，故碳釋放比例為介於 0% 至 100% 的數。若砍伐完畢後，其木材全部被用來作為燃料使用，則此時的碳釋放比率為 100%。在大部分文獻中，為簡化模型與實證操作，假設碳釋放比率為 100%，即砍伐完畢後碳吸存即全部釋放。

⁴ 其他如碳吸存監測 (monitoring)、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。

其他使用之收入 $(\int_0^T C_o(t)e^{-rt} dt)$ 及林木砍伐收入 $((P(T)-H(T))V(T)e^{-rT})$ 。

由 (3) 式可得第 T 時之平均碳吸存成本 (元/公噸) 為下列 (4) 式⁵：

$$\bar{C}(T) = \frac{C_i(0) + \int_0^T C_m(t)e^{-rt} dt + \int_0^T C_o(t)e^{-rt} dt + (P(T)-H(T))V(T)e^{-rT}}{b(T)} \quad (4)$$

三、碳吸存之最適條件

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，其意涵為碳吸存之邊際效益等於碳吸存之邊際成本時，此時點滿足碳吸存效益最大，且達到

最適，令 $\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \frac{\partial B(t)}{\partial t}$ ，可得下式：

$$\begin{aligned} & C_m(t) + C_o(t) + [(P'(t) - H'(t)) - r(P(t) - H(t))]V(t) - [P(t) - H(t)]V'(t) \\ & = [b'(t)V(t) + b'(t)V(t)] \cdot D \cdot BEF \cdot (1 + R) \cdot CF \end{aligned} \quad (5)$$

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

⁵ 若以總碳吸存成本極小為目標，則其一階條件為：

$$C_m(T) + C_o(T) + [(P'(T) - H'(T)) - r(P(T) - H(T))]V(T) - [P(T) - H(T)]V'(T) = 0。$$

若以單位碳吸存成本極小為目標，則其一階條件為：

$$\begin{aligned} & \{ [C_m(T) + C_o(T) + [(P'(T) - H'(T)) - r(P(T) - H(T))]V(T) - [P(T) - H(T)]V'(T)] b(T) \\ & - [C_i(0) + \int_0^T C_m(t)e^{-rt} dt + \int_0^T C_o(t)e^{-rt} dt + (P(T) - H(T))V(T)e^{-rT}] b'(T) \} / b(T)^2 = 0 \end{aligned}$$

參、碳吸存成本效益之實證結果與分析

一、碳吸存效益之估算結果

(一) 林木材積量評估模式

陳麗琴與黃進睦 (1992) 調查蓮華池未經疏伐之杉木人工林，在未考慮地位指數、環境因素差異及林分撫育等因素下，僅以林齡變化為獨立變數，得出杉木單位面積材積與林齡關係指數函數，其函數如 (6) 式，本研究即應用此式估算杉木人工林單位面積之林木材積。

$$\ln(V(t)) = 3.9160 + 0.0690t \quad R^2 = 0.998 \quad (6)$$

根據 (7) 式， V_t 為林齡 t 年之林木材積 (立方公尺/公頃)， t 為林齡 (年)，經指數轉換可得下式：

$$V(t) = \exp(3.9160 + 0.0690t) \quad (7)$$

應用上式之杉木材積與林齡關係函數，為非線性之材積函數，可估算杉木不同林齡之每公頃材積，再將林木材積與各轉換係數代入碳吸存量評估模式，可得不同林齡之碳貯存量。結果顯示：10 年生之杉木，其每公頃材積為 100.08 立方公尺，其累積碳吸存量每公頃為 27.19 噸，15 年生時，其每公頃材積約為 141.32 立方公尺，其碳吸存量每公頃為 38.40 噸，20 年生時，其每公頃材積為 199.54 立方公尺，其每公頃之碳吸存量為 54.22

噸⁶。

(二)木材密度、擴展係數、根莖比例、碳含量比例之估算

基本木材密度 (D) 依 Liu (1982) 對蓮華池地區杉木材質研究，其值約為每立方公尺 0.40 噸。一般在人為造林生長蓄積量推估模式中，主要為幹材的部分，但人造森林吸存二氧化碳轉化為有機碳貯存於植物體，除儲存在幹材之外，尚包括林木之枝、根、葉等部分。Hornig et al. (1985) 曾對蓮華池地區不同輪伐期之杉木人工林地上部生物量進行分析，結果顯示輪伐期為 20 年時樹幹生物量約占地上部生物量的 86.25%，故換算可得林木生物量與地上部生物量的生物量擴展係數為 1.16。根部的生物量的比例，則採用羅天祥與趙士洞 (1997) 計算出根莖比率 (R) 在林木在 10 年生以下為 0.26，林木在 11 年至 30 年生，其根莖比率為 0.22。碳含量比例 (CF) 則根據林裕仁等 (2002) 以元素分析儀測定杉木碳含量為 0.48。因此第 (1) 式之林木碳吸存評估實證模式可改寫成：10 年生以下為 $S(t) = [\exp(3.9160 + 0.0690t)] \times 0.2806$ ，11 年生至 30 年生為 $S(t) = [\exp(3.9160 + 0.0690t)] \times 0.2717$ ，本研究即依此非線性函數關係來推估杉木碳吸存效益。

⁶ 由於造林木的生長受海拔、坡度、土壤、林分密度等生育地狀況及輪伐期所影響 (Liu et al., 1976)，又造林碳吸存量及成本與輪伐期及造林地林地品質有關 (李國忠等, 2000)，另碳吸存量也受經營活動、樹種、地理區位和林地特徵等所影響 (Stavins and Richards, 2005)。本研究僅為分析蓮華池杉木人工林碳吸存量與減量成本結果，為一種合理的預期結果，推估到其他地區或較大範圍有其限制。在林地造林後至成林前，其間尚有許多風險及不確定因素如病蟲害、森林火災等災害、森林管理與林木的生長不如預期等，同時林地的管理集約度及撫育方式 (如施肥、疏伐、修枝)，皆會影響林木的生長，進而影響未來的碳吸存量。而造林後的碳吸存量洩漏 (leakage) 的發生也會減少碳吸存效率而增加碳吸存成本 (Murray et al., 2004; Sohngen and Brown, 2004)。本研究推估碳吸存量時，因受限於前述研究上的限制及資訊不足，故暫未將前述因子考慮在內，僅以人工林之生長資料進行推估。

(三)碳吸存效益之評估模式

為將碳吸存效益貨幣化，本研究採用減少碳稅之繳交，作為造林達成碳減量之效益。根據前人相關課徵碳稅的研究，依王塗發等 (2001) 運用 CGE 模型分析台灣空氣污染防制的經濟衝擊，當對各產業所產生的每噸碳排放量課徵碳稅，使我國的碳排放量於 2020 年時回歸到 2000 年的排放水準時，每噸碳課徵碳稅為 1,820 元。在台灣尚無碳排放權交易制度，若以廠商的角度而言，可用繳交碳稅與提供造林補助金相較，視為一種機會成本，替代政府補助獎勵造林金額。本研究引用每噸碳排放課徵 1,820 元之碳稅，以此作為造林吸存碳的一種替代效益，乘上造林每公頃的碳吸存量，可得出每公頃碳吸存效益價值。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 1,820 元再增減 25%，分別為每噸 1,365 元與 2,275 元，進行敏感度分析。

其次，本研究採用之折現率為 3%，在折現率方面，就地主而言，造林計畫之投資時間較長，且生產過程連續不斷，故受利率影響較大。本研究設定投資造林者為私有地主，故非附件一國家之折現率 (*d*) 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%⁷，因此實質折現率為 3%。

根據以上的參數設定，可估算出蓮華池杉木造林之碳吸存效益如表 1。根據表 1，在林齡為第 10 年時，則材積為每公頃 100.08 立方公尺，累積碳吸存量為每公頃 28.09 噸，碳吸存低效益現值為每公頃 28,401.05 元，中效益現值為每公頃 37,868.07 元，高效益現值為每公頃 47,335.09 元；林齡為第 15 年時，則材積為每公頃 141.32 立方公尺，累積碳吸存量為每公頃 38.40 噸，碳吸存低效益現值為每公頃 33,420.36 元，中效益現值為每公頃 37,868.07 元，高效益現值為每公頃 55,700.61 元；林齡為第 20 年時，則材積為每公頃 199.54 立方公尺，累積碳吸存量為每公頃 54.22 噸，碳吸存低效益現值為每公頃 40,616.13 元，中效益現值為每公頃 54,154.85 元，高效益現值為每公頃 67,693.56 元；林齡為第 30 年時，則材積為每公頃 397.82 立方公尺，累積碳吸存量為每公頃 108.10 噸，碳吸存低效

⁷ 長期通貨膨脹率一般以「物價消費指數之年增率」來計算，根據中央銀行全球資訊網 (2009) 之資料，從 1989 年 3 月到 2009 年 2 月共計 20 年之資料中，其平均通貨膨脹率為 2.15%，故本研究在 20 年期間將長期通貨膨脹率設定為 2%。

益現值為每公頃 59,989.25 元，中效益現值為每公頃 59,989.25 元，高效益現值為每公頃 99,982.08 元。

二、碳吸存成本之估算結果

(一) 初始造林成本 ($C_i(0)$) 與林地經營管理成本 ($C_m(t)$)

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)⁸。苗木費用因缺少實際支出資料，故依全民造林運動中自備種苗補助新台幣 2 萬元計算。由於各項造林成本僅為當年度所支出費用，在進行不同造林地之造林成本比較時，需折算為同一時間基準，本研究依農民雇用工資總指數 (行政院農業委員會，2008)，以 2005 年為基期，依此指數換算出各年度之造林成本⁹，結果如表 2。

⁸ 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。

⁹ 本研究將不同年度之造林成本折算成 2005 年之現值。第一年所需花費之成本項目為整地、栽植、補植一次及刈草二次之工資支出及苗木費用，苗木費用則依全民造林運動中自備種苗補助 2 萬元計算；第二年所需花費之成本項目為補植二次及刈草三次之工資支出；第三至五年所需花費之成本項目為刈草三次之工資支出；第六年所需花費之成本項目為刈草二次之工資支出。將各項成本費用加總，經農民雇用工資總指數折現後，算出杉木人工造林地總造林成本，除以造林面積，即可得每公頃平均造林成本。經估算造林前六年的總成本在 12.98 萬元至 20.12 萬元間，其平均值為 16.84 萬元。而其中各年所占成本比例，第一年為 51.32% 為最高，二至六年其比例分別為 12.67%、9.53%、9.91%、10.34%、6.23%。就各項造林項目成本所占百分比，以撫育作業之刈草所占費用最多，平均約占總造林成本之 54.73%，其次為整地費用，約占總造林成本之 18.45%，新植、補植費用合計共占總造林成本約 14.94%，苗木費用占總成本費用的 11.88%。

表 1 蓮華池杉木造林之碳吸存效益估算

林齡(t) (年)	材積 (m ³ /公頃)	木材密度 (噸)	轉換 係數	根莖 比率	碳含量 比率	碳吸存量 (噸/公頃)	碳吸存效益 (元/公頃)	碳吸存效益現值*		
								低效益值	中效益值	高效益值
1	53.79	0.4	1.16	0.26	0.48	15.09	27,470.38	19,993.88	26,658.51	33,323.13
2	57.63	0.4	1.16	0.26	0.48	16.17	29,432.76	20,789.05	27,718.73	34,648.41
3	61.74	0.4	1.16	0.26	0.48	17.33	31,535.32	21,615.84	28,821.12	36,026.40
4	66.15	0.4	1.16	0.26	0.48	18.56	33,788.09	22,475.51	29,967.35	37,459.18
5	70.88	0.4	1.16	0.26	0.48	19.89	36,201.78	23,369.37	31,159.16	38,948.95
6	75.94	0.4	1.16	0.26	0.48	21.31	38,787.90	24,298.78	32,398.38	40,497.97
7	81.37	0.4	1.16	0.26	0.48	22.83	41,558.76	25,265.16	33,686.88	42,108.59
8	87.18	0.4	1.16	0.26	0.48	24.47	44,527.56	26,269.96	35,026.62	43,783.27
9	93.41	0.4	1.16	0.26	0.48	26.21	47,708.44	27,314.73	36,419.64	45,524.56
10	100.08	0.4	1.16	0.26	0.48	28.09	51,116.55	28,401.05	37,868.07	47,335.09
11	107.23	0.4	1.16	0.22	0.48	29.14	53,029.45	28,593.10	38,124.13	47,655.16
12	114.89	0.4	1.16	0.22	0.48	31.22	56,817.68	29,730.26	39,640.35	49,550.43
13	123.10	0.4	1.16	0.22	0.48	33.45	60,876.51	30,912.65	41,216.86	51,521.08
14	131.89	0.4	1.16	0.22	0.48	35.84	65,225.30	32,142.06	42,856.08	53,570.10
15	141.32	0.4	1.16	0.22	0.48	38.40	69,884.75	33,420.36	44,560.48	55,700.61
16	151.41	0.4	1.16	0.22	0.48	41.14	74,877.05	34,749.51	46,332.68	57,915.85
17	162.23	0.4	1.16	0.22	0.48	44.08	80,225.98	36,131.51	48,175.35	60,219.19
18	173.82	0.4	1.16	0.22	0.48	47.23	85,957.02	37,568.48	50,091.31	62,614.13
19	186.23	0.4	1.16	0.22	0.48	50.60	92,097.47	39,062.60	52,083.46	65,104.33
20	199.54	0.4	1.16	0.22	0.48	54.22	98,676.56	40,616.13	54,154.85	67,693.56

表 1 蓮華池杉木造林之碳吸存效益估算 (續)

林齡(t) (年)	材積 (m ³ /公頃)	木材密度 (噸)	轉換 係數	根莖 比率	碳含量 比率	碳吸存量 (噸/公頃)	碳吸存效益 (元/公頃)	碳吸存效益現值* (元/公頃)
21	213.79	0.4	1.16	0.22	0.48	58.09	105,725.64	42,231.46
22	229.06	0.4	1.16	0.22	0.48	62.24	113,278.28	43,911.02
23	245.43	0.4	1.16	0.22	0.48	66.69	121,370.45	45,657.39
24	262.96	0.4	1.16	0.22	0.48	71.45	130,040.70	47,473.20
25	281.74	0.4	1.16	0.22	0.48	76.56	139,330.31	49,361.23
26	301.87	0.4	1.16	0.22	0.48	82.02	149,283.54	51,324.35
27	323.44	0.4	1.16	0.22	0.48	87.88	159,947.79	53,365.55
28	346.54	0.4	1.16	0.22	0.48	94.16	171,373.86	55,487.92
29	371.30	0.4	1.16	0.22	0.48	100.89	183,616.15	57,694.70
30	397.82	0.4	1.16	0.22	0.48	108.10	196,733.00	59,989.25

資料來源：本研究整理。

註：* 單位碳吸存效益需藉由碳稅來推估，國內有關碳稅稅率的估算差異甚大，因此本研究以王塗發等 (2001) 估算出每噸 1,820 元之碳稅為基準，再增減 25%進行敏感度分析，即碳吸存效益為每噸 1,365 元、每噸 1,820 元及每噸 2,275 元。

表 2 蓮華池杉木造林之造林成本

成本(元)	年份					
	1	2	3	4	5	6
造林經營成本(元/公頃/年)	86,402	21,326	16,040	16,689	17,409	10,488
其他用途之收益(元/公頃/年)*	1,598	1,598	1,598	1,598	1,598	1,598

資料來源：本研究整理。

註：* 本研究將蓮華池杉木造林之機會成本設定為林地之年租金，以南投縣公有土地各地目各等則生產量及佃租標準為計算基準。

(二) 碳吸存之機會成本-其他用途收益 ($C_o(t)$)

由於土地具有稀少性，如供做造林使用便無法從事其他用途之土地使用，因此土地使用必產生機會成本（鄭欽龍，2000），而機會成本也是改變原先土地使用的一種收入損失（Schneider, 2002；King, 2004），根據 van Kooten et al. (2004) 的分析指出在計算碳吸存成本時，如考慮加上機會成本時，則估計平均碳吸存成本將增加 2 倍至 3.5 倍，由此可知在估算碳吸存成本時，機會成本是否列入及數值，將影響後續分析的結果，另外，造林機會成本亦改變現有土地使用型態來造林的一種成本，如原先土地使用為非林地（如農耕地），則機會成本則較原先為林地為高（De Jong et al., 2000）。由於一般所指林地的機會成本為空林地的價值（Zheng, 1994, 2000），本研究為求保守分析，假設以林地每年的地租為其機會成本，由於蓮華池位屬南投縣，故本研究採用南投縣公有土地各地目各等則生產量及佃租標準表中規定，林地為 10 等則，每公頃年租額為 1,598 元，做為林地的每年其他用途收益。

(三) 林木砍伐收入 $((P(T) - H(T))V(T))$

林木收益係以實際木材市場價格資料及前人研究進行分析。由於杉木立木價受原木市價影響，原木市價高，其立木價亦高（Jen, 1984；羅凱安，1991；林俊秀，1991；林俊

成，1994)，原木市價，依省產材杉木品等為中材，規格直徑10公分至20公分，長度為3公尺至5公尺，在南投地區的2005年平均原木市價每立方公尺為1991年時的1.09倍（行政院農業委員會林務局，2008）。因此將陳麗琴與黃進睦（1992）在1991年對原木價格的調查結果加以調整，得到原木價值估算模式為： $\ln(R(t)) = 11.2543 + 0.1065t$ ，藉由指數轉換得 $R(t) = \exp(11.2543 + 0.1065t)$ ，進而推估 $R(t)/V(t)$ 求得原木價格，再扣除伐運費用得到立木價格 $P(t)$ 。其中，本研究將原木價格之估算方式分兩種，一為依據前述推估出連續的原木價格函數，另一種則根據前述推估出原木價格，進而設定離散的原木價格函數，即第1年至第10年生之林木原木價格為每立方公尺1,596.87元，第11年至20年生之林木原木價格為每立方公尺2,237.92元，第21年至30年生之林木原木價格為每立方公尺3,380.57元¹⁰，亦即由伐採地點至木材販售市場，中部地區原木平均每立方公尺伐運費為900元，本研究以農民雇用工資總指數調整，在2005年時原木平均伐運費用為每立方公尺1,193元，因此本研究將每立方公尺之原木市價扣除伐運費用後為立木價格，再乘以林木材積得到林木收益（如表3）。

本研究根據上述得到離散木材價格函數與連續原木價格函數設定下之林木收益。在離散木材價格函數下，林齡為10年之杉木人工林，其每公頃造林收益為29,944.26元，林齡為15年之杉木人工林，其每公頃造林收益為94,154.81元，輪伐期為20年之杉木人工林，其每公頃造林收益為114,427.37元。林齡為25年之杉木人工林，其每公頃造林收益為291,136.24元，林齡為30年之杉木人工林，其每公頃造林收益為353,821.07元。在連續木材價格函數下，林齡為10年之杉木人工林，其每公頃造林收益為77,473.48元，林齡為15年之杉木人工林，其每公頃造林收益為135,741.17元，林齡為20年之杉木人工林，其每公頃造林收益為225,931.69元。林齡為25年之杉木人工林，其每公頃造林收益為363,947.05元，林齡為30年之杉木人工林，其每公頃造林收益為573,320.04元。不

¹⁰ 本研究為嚴謹估計，因此除遵循前人文獻之估算方式（連續原木價格函數）外，由於實務上常使用不同齡級來定位木材價格，故本研究亦採三種位級推估，以數學式表示出離散型態的木材價格函數。

同價格函數設定下蓮華池杉木造林之林木收益比較詳見圖 1，由圖 1 可知，連續原木價格函數曲線為離散原木價格函數曲線之包絡¹¹。

表 3 蓮華池杉木造林之林木收益

林齡	離散原木價格函數-林木收益 (元/公頃)	連續原木價格函數-林木收益 (元/公頃)
1	21,080.21	21,080.21
2	21,918.65	25,230.21
3	22,790.36	29,808.53
4	23,696.75	34,853.15
5	24,639.18	40,405.21
6	25,619.09	46,509.27
7	26,637.97	53,213.62
8	27,697.38	60,570.57
9	28,798.92	68,636.75
10	29,944.26	77,473.48
11	80,555.01	87,147.18
12	83,758.72	97,729.73
13	87,089.85	109,298.95
14	90,553.45	121,939.04
15	94,154.81	135,741.17
16	97,899.39	150,803.97
17	101,792.90	167,234.15
18	105,841.25	185,147.19
19	110,050.61	204,667.99
20	114,427.37	225,931.69
21	249,084.44	249,084.44
22	258,990.49	274,284.31

¹¹ 曲線群組的包絡線 (Envelope)，是指該曲線群中的的每條線都至少一點相切的一條曲線。

表3 蓮華池杉木造林之林木收益 (續)

林齡	離散原木價格函數-林木收益 (元/公頃)	連續原木價格函數-林木收益 (元/公頃)
23	269,290.67	301,702.28
24	280,000.49	331,523.22
25	291,136.24	363,947.05
26	302,714.87	399,189.93
27	314,753.99	437,485.59
28	327,271.90	479,086.69
29	340,287.67	524,266.41
30	353,821.07	573,320.04

資料來源：本研究整理。

註：林木收益之計算方式為每立方公尺之原木市價扣除伐運費用後為立木價格，再乘以林木材積而得之。

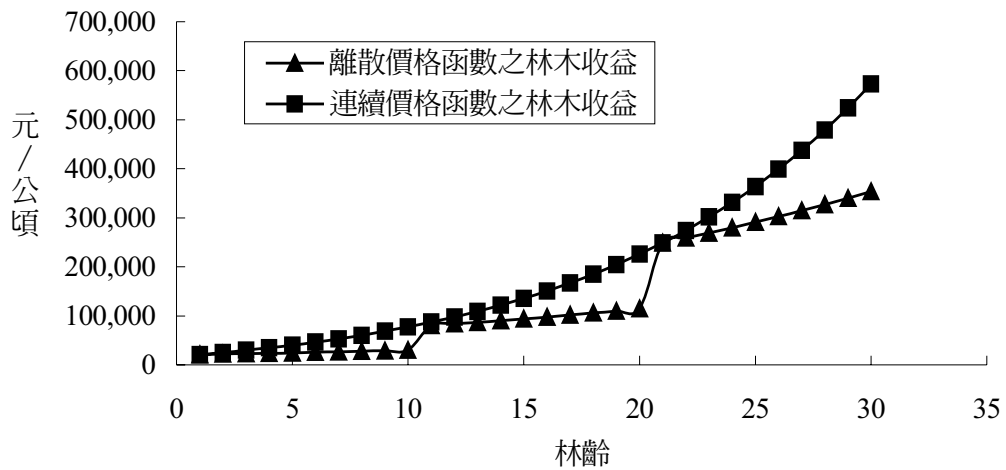


圖1 不同價格函數設定下蓮華池杉木造林之林木收益比較

(四)未考慮不可將杉木任意砍伐而出售之碳吸存成本

根據前述，大部分的文獻在計算碳吸存成本時，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，根據本研究之理論模型，林主在砍伐林木時，碳吸存量將全部釋放，亦即，當林木收益發生的同時，碳吸存量亦隨之逸散至大氣中。因此在如此的理論基礎下，維持碳吸存量的同時，表示林主亦犧牲林木砍伐之收入，因此，林木收益為維持碳吸存量成本之一，此為大多數前人文獻所忽略的。因此，碳吸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¹²。以下本研究先估算未考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況，其結果如表 4 與圖 2。由圖 2 可知，隨著林齡增加，碳吸存效益曲線為一遞增曲線（此為累積之碳吸存效益曲線），而碳吸存成本曲線大致上呈現遞減型態¹³。其次，在未考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況下，可計算出 10 年間平均單位碳吸存成本為每噸 1,028.982 元，20 年間平均單位碳吸存成本為每噸 527.64 元，30 年間平均單位碳吸存成本為每噸 355.01 元。

¹² 本研究設定「碳吸存之機會成本」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「碳吸存成本」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。

¹³ 兩條曲線交點在 1.8 年，即在 1.8 年時，杉木造林之累積碳吸存效益等於累積碳吸存成本。另外因此情境未將碳吸存之機會成本（即未考慮林木收益的部分，但仍有林地之機會成本）列入考慮，故沒有區分不同價格函數設定之分析。

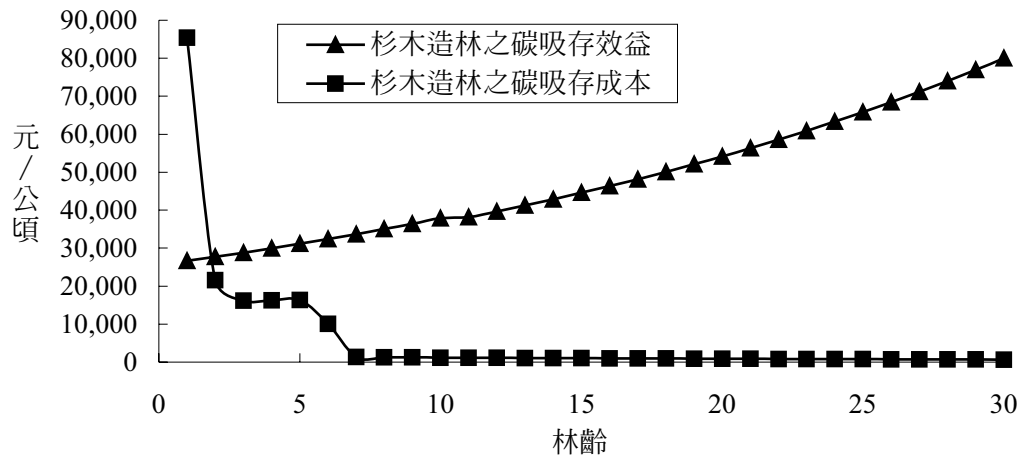


圖 2 未考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林之成本效益比較

表 4 未考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林碳吸存成本

林齡 (年)	累積碳吸存量 (噸/公頃)	碳吸存效益現值 (元/公頃)	總碳吸存成本 (元/公頃)	單位碳吸存成本 (元/噸)
1	15.09	26,658.51	85,399.21	5,657.97
2	16.17	27,718.73	21,589.01	1,334.98
3	17.33	28,821.12	16,119.92	930.33
4	18.56	29,967.35	16,219.11	873.64
5	19.89	31,159.16	16,359.48	822.45
6	21.31	32,398.38	10,095.08	473.68
7	22.83	33,686.88	1,295.31	56.73
8	24.47	35,026.62	1,257.03	51.38
9	26.21	36,419.64	1,219.88	46.54
10	28.09	37,868.07	1,183.83	42.15
11	29.14	38,124.13	1,148.84	39.43
12	31.22	39,640.35	1,114.89	35.71

表 4 未考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林碳吸存成本 (續)

林齡 (年)	累積碳吸存量 (噸/公頃)	碳吸存效益現值 (元/公頃)	總碳吸存成本 (元/公頃)	單位碳吸存成本 (元/噸)
13	33.45	41,216.86	1,081.94	32.35
14	35.84	42,856.08	1,049.96	29.30
15	38.40	44,560.48	1,018.93	26.54
16	41.14	46,332.68	988.82	24.03
17	44.08	48,175.35	959.59	21.77
18	47.23	50,091.31	931.23	19.72
19	50.60	52,083.46	903.71	17.86
20	54.22	54,154.85	877.00	16.18
21	58.09	56,308.61	851.08	14.65
22	62.24	58,548.03	825.93	13.27
23	66.69	60,876.51	801.52	12.02
24	71.45	63,297.60	777.83	10.89
25	76.56	65,814.98	754.84	9.86
26	82.02	68,432.47	732.53	8.93
27	87.88	71,154.07	710.88	8.09
28	94.16	73,983.90	689.87	7.33
29	100.89	76,926.27	669.48	6.64
30	108.10	79,985.67	649.70	6.01

資料來源：本研究整理。

註：1. 碳吸存成本之估算根據第 (3) 式，單位碳吸存成本之估算根據第 (4) 式。

2. 由單位碳吸存成本一欄可計算出 10 年間平均單位碳吸存成本為每噸 1,028.982 元，20 年間平均單位碳吸存成本為每噸 527.64 元，30 年間平均單位碳吸存成本為每噸 355.01 元。

(五)考慮不可將杉木任意砍伐而出售之碳吸存成本

1. 累積碳吸存成本之分析

碳吸存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碳吸存成本，根據上述估算出不同價格函數設定下之碳吸存成本，離散價格函數設定下之碳吸存成本計算結果如表5。根據表5，在離散之原木價格函數設定下，林木為第10年生時，其碳吸存成本為每公頃31,128.09元，20年生時，其碳吸存成本為每公頃115,304.37元，30年生時，其碳吸存成本為每公頃354,470.77元。

連續價格函數設定下碳吸存成本計算結果如表6。根據表6，在連續之原木價格函數設定下，林木為第10年生時，其碳吸存成本為每公頃88,296.02元，20年生時，其碳吸存成本為每公頃226,808.69元，30年生時，其碳吸存成本為每公頃573,969.73元。

表5 考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林碳吸存成本(離散價格函數)

林齡 (年)	累積碳吸存量 (噸/公頃)	碳吸存效益現值 (元/公頃)	總碳吸存成本 (元/公頃)	單位碳吸存成本 (元/噸)
1	15.09	26,658.51	106,479.42	7,054.60
2	16.17	27,718.73	43,507.66	2,690.33
3	17.33	28,821.12	38,910.28	2,245.63
4	18.56	29,967.35	39,915.86	2,150.07
5	19.89	31,159.16	40,998.65	2,061.16
6	21.31	32,398.38	35,714.17	1,675.77
7	22.83	33,686.88	27,933.29	1,223.29
8	24.47	35,026.62	28,954.41	1,183.47
9	26.21	36,419.64	30,018.80	1,145.17
10	28.09	37,868.07	31,128.09	1,108.31
11	29.14	38,124.13	81,703.85	2,804.12
12	31.22	39,640.35	84,873.61	2,718.70
13	33.45	41,216.86	88,171.79	2,636.04
14	35.84	42,856.08	91,603.41	2,556.04

表 5 考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林碳吸存成本(離散價格函數)(續)

林齡 (年)	累積碳吸存量 (噸/公頃)	碳吸存效益現值 (元/公頃)	總碳吸存成本 (元/公頃)	單位碳吸存成本 (元/噸)
15	38.40	44,560.48	95,173.74	2,478.60
16	41.14	46,332.68	98,888.21	2,403.63
17	44.08	48,175.35	102,752.49	2,331.03
18	47.23	50,091.31	106,772.48	2,260.73
19	50.60	52,083.46	110,954.32	2,192.64
20	54.22	54,154.85	115,304.37	2,126.68
21	58.09	56,308.61	249,935.52	4,302.48
22	62.24	58,548.03	259,816.42	4,174.37
23	66.69	60,876.51	270,092.18	4,050.14
24	71.45	63,297.60	280,778.32	3,929.67
25	76.56	65,814.98	291,891.08	3,812.82
26	82.02	68,432.47	303,447.40	3,699.50
27	87.88	71,154.07	315,464.87	3,589.58
28	94.16	73,983.90	327,961.78	3,482.97
29	100.89	76,926.27	340,957.15	3,379.56
30	108.10	79,985.67	354,470.77	3,279.25

資料來源：本研究整理。

註：1. 碳吸存成本之估算根據第 (3) 式，單位碳吸存成本之估算根據第 (4) 式。

2. 由於第一年需要投入較高之造林成本，故單位碳吸存成本較高，為每噸 7,054.60 元。
3. 由單位碳吸存成本一欄可計算出 10 年間平均單位碳吸存成本為每噸 2,253.78 元，20 年間平均單位碳吸存成本為每噸 2,352.30 元，30 年間平均單位碳吸存成本為每噸 2,824.88 元。

表6 考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林碳吸存成本(連續價格函數)

林齡 (年)	累積碳吸存量 (噸/公頃)	碳吸存效益現值 (元/公頃)	總碳吸存成本 (元/公頃)	單位碳吸存成本 (元/噸)
1	15.09	26,658.51	106,479.42	7,054.60
2	16.17	27,718.73	46,819.22	2,895.11
3	17.33	28,821.12	45,928.45	2,650.67
4	18.56	29,967.35	51,072.27	2,751.01
5	19.89	31,159.16	56,764.68	2,853.77
6	21.31	32,398.38	56,604.34	2,743.06
7	22.83	33,686.88	54,508.94	2,465.40
8	24.47	35,026.62	61,827.60	2,609.97
9	26.21	36,419.64	69,856.63	2,752.29
10	28.09	37,868.07	78,657.31	2,892.41
11	29.14	38,124.13	88,296.02	3,030.37
12	31.22	39,640.35	98,844.62	3,166.22
13	33.45	41,216.86	110,380.88	3,300.01
14	35.84	42,856.08	122,989.00	3,431.80
15	38.40	44,560.48	136,760.10	3,561.63
16	41.14	46,332.68	151,792.78	3,689.55
17	44.08	48,175.35	168,193.74	3,815.63
18	47.23	50,091.31	186,078.42	3,939.91
19	50.60	52,083.46	205,571.70	4,062.44
20	54.22	54,154.85	226,808.69	4,183.28
21	58.09	56,308.61	249,935.52	4,302.48
22	62.24	58,548.03	275,110.24	4,420.09
23	66.69	60,876.51	302,503.80	4,536.17
24	71.45	63,297.60	332,301.05	4,650.76
25	76.56	65,814.98	364,701.89	4,763.91
26	82.02	68,432.47	399,922.47	4,875.68
27	87.88	71,154.07	438,196.47	4,986.11
28	94.16	73,983.90	479,776.56	5,095.25
29	100.89	76,926.27	524,935.89	5,203.16
30	108.10	79,985.67	573,969.73	5,309.86

資料來源：本研究整理。

註：1. 碳吸存成本之估算根據第(3)式，單位碳吸存成本之估算根據第(4)式。

2. 由於第一年需要投入較高之造林成本，故單位碳吸存成本較高，為每噸 7,054.60 元。
3. 由單位碳吸存成本一欄可計算出 10 年間平均單位碳吸存成本為每噸 3,166.83 元，20 年間平均單位碳吸存成本為每噸 3,392.46 元，30 年間平均單位碳吸存成本為每噸 3,866.42 元。

由上述可知，當碳吸存成本考慮林木收益之成本後，則隨著林齡增加，離散價格函數設定之碳吸存成本曲線、連續價格函數設定之碳吸存成本曲線以及碳吸存效益曲線均呈現遞增趨勢 (如圖 3)，當碳吸存成本考慮林木收益之機會成本後，無論何種價格函數設定，碳吸存效益均小於累積碳吸存成本¹⁴；而邊際碳吸存效益與邊際碳吸存成本曲線亦呈現遞增型態，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，其意涵為碳吸存之邊際效益等於碳吸存之邊際成本時，則此時點之碳吸存量達到最適，即滿足 $\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \frac{\partial B(t)}{\partial t}$ 。以連續價格函數為例 (如圖 4)，邊際成本與邊際效益相等之時間點有兩個，且發生在造林初期，且越到造林後期，其碳吸存成本之增加幅度將越大，其林主砍伐將林木加以販售之誘因也越高。此時政府若不希望林主提早伐木，則有必要對林主提供造林獎勵誘因，例如經濟補貼、減稅等相關政策。

¹⁴ 碳吸存成本曲線在碳吸存效益曲線的上方，其主要原因在於碳吸存成本包含造林成本、林地其他用途之收益以及林木砍伐收入現值，這些成本對應產出的效益不只有碳吸存效益，尚包括水源涵養效益、景觀效益、淨化空氣效益等，碳吸存效益僅為林木產出外部效益的其中之一。

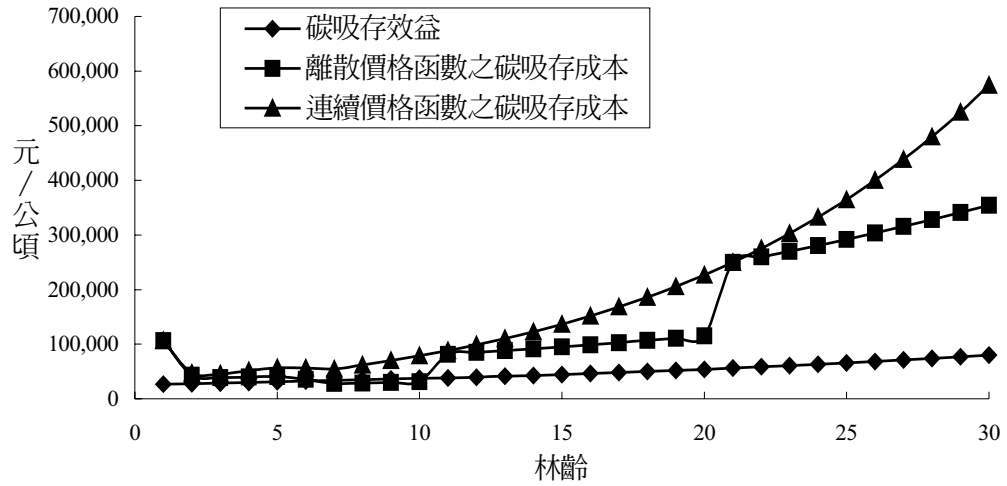


圖3 考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林碳吸存成本與效益

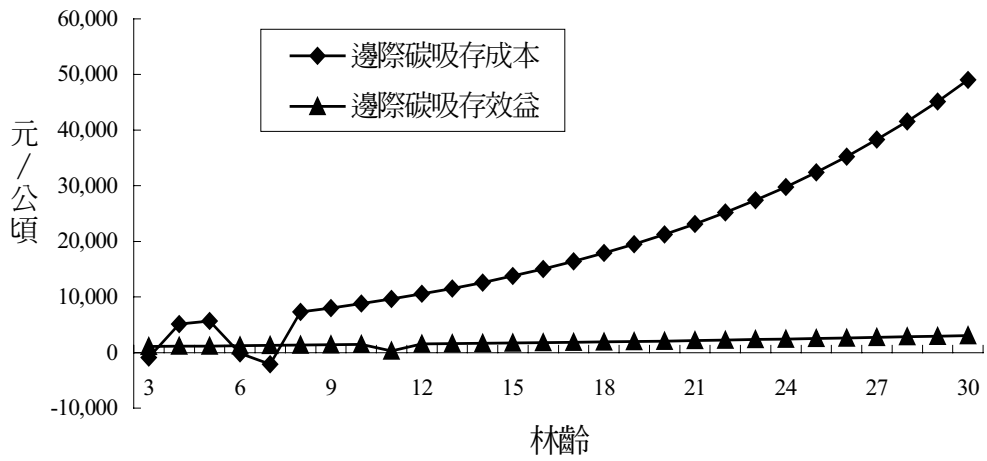


圖4 考慮不可將杉木任意砍伐而出售下蓮華池杉木造林之碳吸存邊際成本與效益

2. 單位碳吸存成本之分析

根據表 4 與表 5，在種植杉木 30 年之研究期間內，考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況，且離散價格函數設定下，單位碳吸存成本介於每噸 1,108.31 元至 4,302.48 元¹⁵，最低之單位碳吸存成本發生在第 10 年，最高之單位碳吸存成本發生在第 21 年 (如圖 5)。此時，可計算出 10 年間平均單位碳吸存成本為每噸 2,253.78 元，20 年間平均單位碳吸存成本為每噸 2,352.30 元，30 年間平均單位碳吸存成本為每噸 2,824.88 元。

再考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況，且連續價格函數設定下，單位碳吸存成本介於每噸 2,465.40 元至 4,536.17 元，最低之單位碳吸存成本發生在第 7 年，最高之單位碳吸存成本發生在第 30 年 (如圖 5)。此時，可計算出 10 年間平均單位碳吸存成本為每噸 3,166.83 元，20 年間平均單位碳吸存成本為每噸 3,392.46 元，30 年間平均單位碳吸存成本為每噸 3,866.42 元。

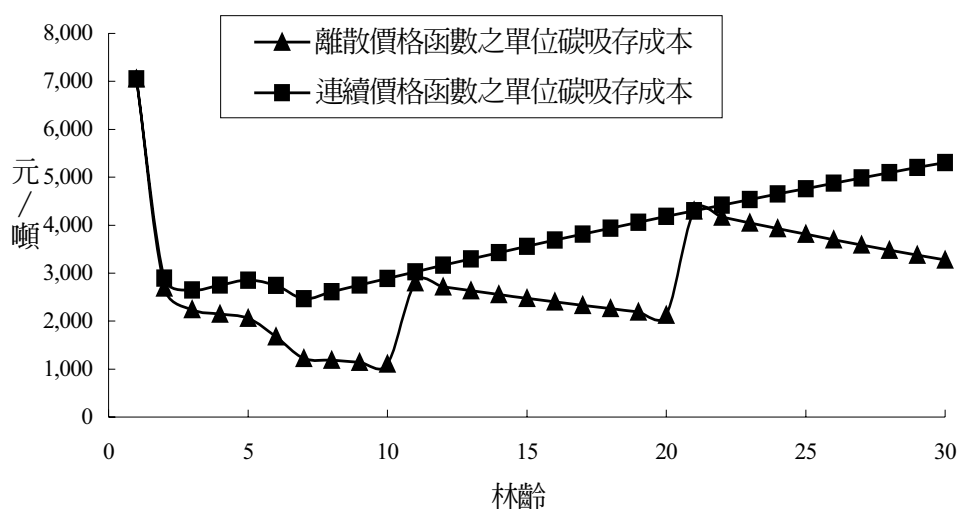


圖 5 不同價格函數設定下蓮華池杉木造林之單位碳吸存成本

¹⁵ 由於第一年之初始造林成本投入較多，故第一年之單位碳吸存成本為每噸 7,054.60 元，屬於資料上之偏離值，故在單位碳吸存成本上不予以納入討論比較。

3. 考慮不同碳釋放比率之敏感度分析

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 7，如表 7 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，若價格函數為離散函數，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 362.00 元，當碳釋放比率為 70% 時，碳吸存單位成本為每噸 788.46 元，當碳釋放比率為 100% 時，碳吸存單位成本為每噸 1,108.31 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 649.33 元，當碳釋放比率為 70% 時，碳吸存單位成本為每噸 1,493.53 元，當碳釋放比率為 100% 時，碳吸存單位成本為每噸 2,126.68 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 987.98 元，當碳釋放比率為 70% 時，碳吸存單位成本為每噸 2,297.28 元，當碳釋放比率為 100% 時，碳吸存單位成本為每噸 3,279.25 元。

若價格函數為連續函數，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 898.20 元，當碳釋放比率為 70% 時，碳吸存單位成本為每噸 2,037.75 元，當碳釋放比率為 100% 時，碳吸存單位成本為每噸 2,892.41 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 1,266.31 元，當碳釋放比率為 70% 時，碳吸存單位成本為每噸 2,933.15 元，當碳釋放比率為 100% 時，碳吸存單位成本為每噸 4,183.28 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 1,597.17 元，當碳釋放比率為 70% 時，碳吸存單位成本為每噸 3,718.71 元，當碳釋放比率為 100% 時，碳吸存單位成本為每噸 5,309.86 元。

表 7 考慮不同碳釋放比率之蓮華池杉木造林碳吸存成本估算

林齡 (年)	單位碳吸存成本 (元/噸)					
	離散原木價格函數			連續原木價格函數		
	$\theta = 30\%$	$\theta = 70\%$	$\theta = 100\%$	$\theta = 30\%$	$\theta = 70\%$	$\theta = 100\%$
10	362.00	788.46	1,108.31	898.20	2,037.75	2,892.41
15	762.15	1,742.98	2,478.60	1,087.06	2,501.10	3,561.63
20	649.33	1,493.53	2,126.68	1,266.31	2,933.15	4,183.28
25	1,150.75	2,671.93	3,812.82	1,436.08	3,337.70	4,763.91
30	987.98	2,297.28	3,279.25	1,597.17	3,718.71	5,309.86

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%。

本研究計算出之平均單位碳吸存成本與特定時點單位碳吸存成本結果如表 8 與表 9。根據表 8 與表 9 可知，若未考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況，則將會顯著低估碳吸存成本。由理論基礎來看，應考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況較為妥當。由表 7，若無考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況，則平均單位碳吸存成本在 288.01 元至 1,028.982 元之間；若考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況，則平均單位碳吸存成本在 2,253.78 元至 2,866.42 元之間，就前人文獻回顧可知(如表 10)，文獻之碳吸存成本之差異極大¹⁶。與我國蓮華池杉木造林之碳吸存成本相比，若無考慮不可將杉木任意砍伐而

¹⁶ 碳吸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 (公噸/公頃/年)：每年碳保存成長率之軌跡；(2)平均碳保存流量 (公噸/公頃/年)：林業政策實施期間之每年碳增量；(3)累積碳量 (公噸/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 (公噸/公頃)：一個政策平均而言碳保存之總量；(5)保留下來的碳量 (公噸/公頃)：亦即

出售之情況，則蓮華池杉木造林之平均單位碳吸存成本在 288.01 元至 1,028.982 元之間¹⁷，與國內外文獻上計算之單位碳成本相符，甚至低許多；若考慮不可將杉木任意砍伐而出售之情況，則平均單位碳吸存成本在 2,253.78 元至 2,866.42 元之間¹⁸，與國內外文獻之估算造林碳成本相比，沒有明顯偏高¹⁹。

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 (Nordhaus, 1991; Richards et al., 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 et al., 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 et al., 1991; Dixon et al., 1994; Maser et al., 1995; Xu, 1995; Wangwacharakul and Bowonwiwat, 1995)。

¹⁷ 以 2008 年 6 月 26 日當天之匯率換算，1 美元相當於 30.33 新台幣，故換算可得無考慮碳吸存之機會成本下，蓮華池杉木造林之平均單位碳吸存成本介在 9.50 美元至 33.93 美元之間。

¹⁸ 以 2008 年 6 月 26 日當天之匯率換算，1 美元相當於 30.33 新台幣，故換算可得考慮碳吸存之機會成本下，蓮華池杉木造林之平均單位碳吸存成本介在 74.3 美元至 94.51 美元之間。

¹⁹ 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¹⁹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，

表 8 蓮華池杉木造林之平均單位碳吸存成本估算比較

林齡(年)	未考慮機會成本的平均 單位碳吸存成本(元/噸)	考慮機會成本的平均單位碳吸存成本(元/噸)	
		離散原木價格函數	連續原木價格函數
10	1,028.982	2,253.78	3,166.83
20	527.64	2,352.30	3,392.46
30	355.01	2,824.88	3,866.42

資料來源：本研究整理。

註：此表中的平均單位碳吸存成本，為 10 年間、20 年間與 30 年間之單位碳吸存成本平均值。

表 9 蓮華池杉木造林之單位碳吸存成本估算比較

林齡(年)	未考慮機會成本的單位 碳吸存成本(元/噸)	考慮機會成本的單位碳吸存成本(元/噸)	
		離散原木價格函數	連續原木價格函數
10	42.15	1,108.31	2,892.41
15	26.54	2,478.60	3,561.63
20	16.18	2,126.68	4,183.28
25	9.86	3,812.82	4,763.91
30	6.01	3,279.25	5,309.86

資料來源：本研究整理。

註：此表中的單位碳吸存成本，為第 10 年、第 20 年與第 30 年之單位碳吸存成本值。

再根據過去文獻結果顯示 (Den Elzen and de Moor, 2002; International Emissions Trading Association, 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為 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¹⁹)，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)。

表 10 國內外估算造林碳吸存成本之相關文獻

作者	年份	研究區域	造林碳吸存成本(元/噸)
Moulton and Richards	1990	美國	9美元至41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
Xu	1995	中國	低於2美元
Callaway and McCarl	1996	美國	10美元至150美元
Sedjo	1999	阿根廷	20美元
IPCC	2001	美國	0.1美元至100美元
Richards and Stokes	2004	美國	10美元至150美元 森林保育：46.62美元至260.29美元
van Kooten et al.	2004	美國	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
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

資料來源：本研究整理。

肆、結論與建議

加強造林與促進森林永續經營策略之環境適應 (adaptation) 方法，為國際碳減量重要策略之一。近年來國內林業部門所推行的造林獎勵政策，如獎勵造林、全民造林及平地景觀造林，確可增加森林造林面積及碳吸存量。本研究之主要貢獻可分為理論與實證兩部分，在理論部分，本研究提出不同以往之碳吸存成本計算方式，亦即碳吸存成本除考慮造林成本、造林經營管理成本及其他用途收益外，亦需考慮因維持碳吸存量存在而犧牲之收益，例如林木收益，換言之，碳吸存之成本除造林成本、其他使用之收入外，應含有不可將杉木任意砍伐出售之收入。其次，在實證部分，本研究取得蓮華池研究中

心轄區杉木人工林之生長與成本資料，藉由碳吸存量評估模式，分析杉木人工林不同林齡之碳吸存量。綜合理論與實證結果，本研究分析人為造林之碳吸存成本與效益，對於邊際成本與邊際效益進行分析，計算出單位碳吸存成本，並與前人文獻之碳吸存成本、國際上之碳價格進行比較，期能供政府擬定造林減碳政策之參考。

根據本研究之實證結果，在碳吸存效益部分，在林齡為第 10 年時，則材積為每公頃 100.08 立方公尺，累積碳吸存量為每公頃 28.09 噸，碳吸存效益現值為每公頃 37,868.07 元，林齡為第 20 年時，則材積為每公頃 199.54 立方公尺，累積碳吸存量為每公頃 54.22 噸，碳吸存效益現值為每公頃 54,154.85 元。其次，在木材收益部分，在離散木材價格函數下，林齡為 10 年之杉木人工林，其每公頃造林收益為 29,944.26 元，輪伐期為 20 年之杉木人工林，其每公頃造林收益為 114,427.37 元。在連續木材價格函數下，林齡為 10 年之杉木人工林，其每公頃造林收益為 77,473.48 元，林齡為 20 年之杉木人工林，其每公頃造林收益現值為 225,931.69 元。

在碳吸存成本部分，在離散之原木價格函數設定下，林木為第 10 年生時，其碳吸存成本為每公頃 31,128.09 元，換算可得單位碳吸存成本為每噸 1,108.31 元，20 年生時，其碳吸存成本為每公頃 115,304.37 元，換算可得單位碳吸存成本為每噸 2,126.68 元。在連續之原木價格函數設定下，林木為第 10 年生時，其碳吸存成本為每公頃 88,296.02 元，換算可得單位碳吸存成本為每噸 2,892.41 元，20 年生時，其碳吸存成本為每公頃 226,808.69 元，換算可得單位碳吸存成本為每噸 4,183.28 元。；另外，由於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，當碳釋放比率越高時，則碳吸存成本越高。由本研究可知，若沒有考慮不可將杉木任意砍伐而出售下來計算造林碳吸存成本，顯然會低估造林之碳吸存成本。以本研究之實證結果為例，在沒有考慮不可將杉木任意砍伐而出售下，平均單位碳吸存成本在 288.01 元至 1,028.982 元之間，若考慮不可將杉木任意砍伐而出售下，則平均單位碳吸存成本在 2,253.78 元至 2,866.42 元之間，根據國內外文獻顯示，碳

吸存成本計算受到許多因素影響，如造林成本、土地其他用途之機會成本以及碳流量、材積、木材價格之估計方法不同而影響碳吸存成本之高低，本研究所計算出來之碳吸存成本數字與國內外文獻大致相符。

(收件日期為民國98年7月10日，接受日期為民國99年1月6日)

參考文獻

(1)中文部分

1. 中央銀行全球資訊網，2009，重要金融指標，台北：中央銀行，取自 <http://www.cbc.gov.tw/ct.asp?xItem=995&ctNode=523&mp=1>。
2. 王塗發、李秉正與曾瓊瑤，2001，「台灣空氣汙染防制的經濟衝擊分析：CGE模型的運用」，環境資源經濟、管理暨系統分析學術研討會，台北：中央研究院經濟研究所。
3. 任憶安與林俊成，1997，「台灣私有林造林獎勵方式效果的評估－林農反應調查報告」，台灣林業科學，12：393-402。
4. 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。
5. 行政院農業委員會林務局，1995，第三次全省森林資源及土地利用調查，台北：行政院農業委員會林務局。
6. 行政院農業委員會林務局，2007，林業統計，台北：行政院農業委員會林務局，取自 <http://subject.forest.gov.tw/web/publication/statistic/ebook.htm>。
7. 李國忠、林俊成與陳麗琴，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，15：115-123。
8. 汪大雄、鍾旭和與林俊秀，1994，「苗栗縣公私有林經營現況之調查分析」，林業試驗所研究報告季刊，12：143-160。
 9. 林俊成，1994，「私有林經營意願與補貼制度之研究—台北縣個案研究」，國立台灣大學森林學研究所碩士論文。
 10. 林俊成、李國忠與林裕仁，1999，「柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究」，台大實驗林研究報告，13：51-60。
 11. 林俊成、鄭美如、劉淑芬與李國忠，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，17：311-321。
 12. 林俊秀，1991，「山胞保留地林地轉用問題之研究-土地使用管制之效率性與公平性」，國立台灣大學森林學研究所碩士論文。
 13. 林俊秀、汪大維、吳萬益與任憶安，1993，「杉木利用現況之調查」，林業試驗所研究報告季刊，8：365-369。
 14. 林裕仁、劉瓊霏與林俊成，2002，「台灣地區主要用材比重與碳含量測定」，台灣林業科學，17：291-299。
 15. 林國慶與柳婉郁，2005，「因應二氧化碳排放減量策略下最適造林面積之經濟分析」，台灣經濟學會年會暨學術研討會，台北：政治大學。
 16. 林國慶與柳婉郁，2006a，「考量碳吸存效益之杉木造林最適獎勵金分析」，農業經濟半年刊，79：71-102。
 17. 林國慶與柳婉郁，2006b，「考慮碳吸存價格下最適輪伐期與林地期望價值之實證分析」，台灣農村經濟學會年會暨學術研討會，台北：國立台灣大學。
 18. 林國慶與柳婉郁，2007a，「平地景觀造林政策之執行成果與實證分析」，經社法制論叢，40：175-211。
 19. 林國慶與柳婉郁，2007b，「全民造林政策之執行成果與政策分析」，農業與經濟，38：31-65。

20. 林國慶、陳吉仲、張靜貞、李恒綺與柳婉郁，2007，「休耕農地環境用途效益評估及農地環境給付政策措施之研究」，行政院農業委員會科技研究計畫，96農科-5.1.1-企-Q3(4)。
21. 柳婉郁，2004，「最適造林獎勵金之研究」，國立台灣大學農業經濟學研究所碩士論文。
22. 柳婉郁，2008，「地主參與碳匯方案與機制之經濟分析」，國立台灣大學農業經濟學研究所博士論文。
23. 陳麗琴與黃進睦，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，7：221-230。
24. 鄭欽龍，2000，「再造林成本與林木伐採決策之分析」，中華林學季刊，33：81-87。
25. 羅天祥與趙士洞，1997，「中國杉木林生物生產力格局及其數學模型」，植物生態學報，21：403-415。
26. 羅凱安，1991，「南投林區國有租地造林地經營管理成本效益評估之研究」，國立中興大學森林研究所碩士論文。
27. 羅凱安，1996，「私人經營林地使用與影響因素之研究—以南投縣內南港溪集水區為例」，國立中興大學森林研究所博士論文。

(2)英文部分

1. Adams, D., R. Alig, B. McCarl, J. Callaway, and S. Winnett, 1999, "Minimum Cost Strategies for Sequestering Carbon in Forests," *Land Economics*, 75:360-374.
2. 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*, 11:76-87.
3. Alig, R., D. Adams, B. McCarl, J. M. Callaway, and S. Winnett, 1997, "Assessing Effects of Mitigation Strategies for Global Climate Change with an Intertemporal Model of the U.S."

- Forest and Agriculture Sectors,” *Environmental and Resource Economics*, 9:259-274.
4. 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.
 5. Chladná, Z., 2007, “Determination of Optimal Rotation Period under Stochastic Wood and Carbon Prices,” *Forest Policy and Economics*, 9:1031-1045.
 6. De Jong, B. H. J., R. Tipper, and G. Montoya-Gomez, 2000, “An Economic Analysis of the Potential for Carbon Sequestration by Forests: Evidence from Southern Mexico,” *Ecological Economics*, 33:313-327.
 7. Den Elzen, M. G. J. and A. P. G. de Moor, 2002, “Analyzing the Kyoto Protocol under the Marrakesh Accords: Economic Efficiency and Environmental Effectiveness,” *Ecological Economics*, 43:141-158.
 8. Dixon, R., J. Winjum, K. Andrasko, J. Lee, and P. Schroeder, 1994, “Integrated Land-use Systems: Assessment of Promising Agroforestry and Alternative Land-use Practices to Enhance Carbon Conservation and Sequestration,” *Climate Change*, 27:71-92.
 9. Dixon, R., P. Schroeder, and J. Winjum, 1991, “Assessment of Promising Forest Management Practices and Technologies for Enhancing the Conservation and Sequestration of Atmospheric Carbon and their Costs at the Site Level,” the U.S. Environmental Protection Agency. #EPA/600/3-91/067. Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR.
 10. Dudek, D. J. and A. Leblanc, 1990, “Offsetting New CO₂ Emission: a Rational First Greenhouse Policy Step,” *Contemporary Policy Issues*, 8:29-42.
 11. European Climate Exchange, 2007, Available from http://www.europeanclimateexchange.com/default_flash.asp
 12. Grubb, M., 2003. “On Carbon Prices and Volumes in the Evolving ‘Kyoto Market’,” in OECD ed., *Global Forum on Sustainable Development: Emission Trading*, 21, OECD Headquarters, Paris.
 13. Horng, F. W., J. C. Sun, and S. G. Hwang, 1985, “Aboveground Biomass Distribution of China Fir Plantations with Respect to Age at Lienhuachi,” *Bulletin of Taiwan Forestry*

Research Institute No. 444, Taipei, Taiwan, ROC.

14. Huang, C., R. Bates, G. D. Kronrad, and S. Cheng, 2004, "Economic Analyses of Sequestering Carbon in Loblolly Pine, Cherrybark Oak and Northern Red Oak in the United States," *Environmental Management*, 33:187-199.
15. IETA, 2003, *Greenhouse Gas Market 2003*, International Emission Trading Association, Geneva, Switzerland.
16. IPCC, 2001, *IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001*, Available from <http://www.ipcc.ch/>.
17. IPCC, 2003, *Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry*, Edited by Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner, Hayama: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
18. Jen, I. A., 1984, "An Economic Analysis on Planting China Fir (*Cunninghamia Lanceolata* (Lamb.) Hook) in Taiwan," *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute No. 433*, Taipei Taiwan, ROC.
19. King, D. M., 2004, "Trade-based Carbon Sequestration Accounting," *Environmental Management*, 33:559-571.
20. Lewis, D., D. Turner, and J. Winjum, 1996, "An Inventory-based Procedure to Estimate Economic Costs of Forest Management on a Regional Scale to Conserve and Sequester Atmospheric Carbon," *Ecological Economics*, 16:35-49.
21. Liu, S. C., 1982. "Growth and Wood Properties of Planted China Fir (*Cunninghamia lanceolata*) in Taiwan," *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute No. 375*, Taipei, Taiwan, ROC.
22. Liu, S. C., F. F. Tai, and P. T. Wang, 1976, "The Growth of Planted Luan-tai Fir (*Cunninghamia konishii* Hay.) in Relation to Site Conditions," *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute No. 280*, Taipei, Taiwan, ROC.
23. Makundi, W. and A. Okitingati, 1995, "Carbon Flows and Economic Evaluation of Mitigation Options in Tanzania's Forest Sector," *Biomass Bioenergy*, 8:381-393.
24. Masera, O., M. Bellon, and G. Segura, 1995, "Forest Management Options for Sequestering

- Carbon in Mexico,” *Biomass and Bioenergy*, 8:357-368.
25. Moulton, R. J. and K. R. Richards, 1990, “Costs of Sequestering Carbon through Tree Planting and Forest Management in the United States,” *General Technical Report WO-58*, USDA Forest Service, Washington, DC.
 26. Murray, B. C., B. A. McCarl, and H. C. Lee, 2004, “Estimating Leakage from Forest Carbon Sequestration Programs,” *Land Economics*, 80:109-124.
 27. New York State Energy Office, 1991, *Analysis of Carbon Reduction in New York State*, New York State Energy Office, New York.
 28. 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: 211-235.
 29. Nordhaus, W. D., 1991, “The Cost of Slowing Climate Change: a Survey,” *The Energy Journal*, 12:37-65.
 30. Olschewski, R., P. C. Benítez, and G. H. J. de Koning, 2005, “How Attractive Are Forest Carbon Sinks? Economic Insights into Supply and Demand of Certified Emission Reductions,” *Journal of Forest Economics*, 11:77-94.
 31. Parks, P. and I. Hardie, 1995, “Least-cost Forest Carbon Reserves: Cost-effective Subsidies to Convert Marginal Agricultural Land to Forests,” *Land Economics*, 71:122-136.
 32. Plantinga, A. and T. Mauldin, 2001, “A Method for Estimating the Cost of CO₂ Mitigation through Afforestation,” *Climate Change*, 49:21-40.
 33. Plantinga, A. J. and J. Wu, 2003, “Co-benefits from Carbon Sequestration in Forests: Evaluating Reductions in Agricultural Externalities from an Afforestation Policy in Wisconsin,” *Land Economics*, 79:74-85.
 34. Plantinga, A. J., T. Mauldin, and D. J. Miller, 1999, “An Econometric Analysis of the Costs of Sequestering Carbon in Forests,” *American Journal of Agricultural Economics*, 81: 812-824.
 35. Ravindranath, N. and B. Somashekhar, 1995, “Potential and Economics of Forestry Options for Carbon Sequestration in India,” *Biomass Bioenergy*, 8:323-336.
 36. Richards, K. R. and C. Stokes, 2004, “A Review of Forest Carbon Sequestration Cost

- Studies: a Dozen Years of Research,” *Climatic Change*, 63:1-48.
37. Richards, K., 1997, “Estimating Costs of Carbon Sequestration for a United States Greenhouse Gas Policy,” Report Prepared for Charles River Associates, November.
 38. Richards, K., R. Moulton, and R. Birdsey, 1993, “Costs of Creating Carbon Sinks in the U.S.,” *Energy Conservation and Management*, 34:905-912.
 39. Robertson, K., I. Loza-Balbuena, and J. Ford-Robertson, 2004, “Monitoring and Economic Factors Affecting the Economic Viability of Afforestation for Carbon Sequestration Projects,” *Environmental Science and Policy*, 7:465-475.
 40. Schneider, U. A., 2002, “The Cost of Agricultural Carbon Saving,” *Working Paper 02-WP 306*, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.
 41. 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, Washington, DC.
 42. Sohngen, B. and S. Brown, 2004, “Measuring Leakage from Carbon Projects in Open Economies: a Stop Timber Harvesting Project in Bolivia as a Case Study,” *Canadian Journal of Forest Research*, 34:829-839.
 43. Stavins, R. N. and K. R. Richards, 2005, “The Cost of U.S. Forest-based Carbon Sequestration,” The Pew Center on Global Climate Change, Arlington, VA.
 44. Stavins, R. N., 1999, “The Costs of Carbon Sequestration: a Revealed-preference Approach,” *American Economic Review*, 89:994-1009.
 45. van Kooten, G. C., A. J. Eagle, J. Manley, and T. Smolak, 2004, “How Costly Are Carbon Offsets? A Meta-analysis of Carbon Forest Sinks,” *Environmental Science and Policy*, 7: 239-251.
 46. van Kooten, G. C., L. M. Arthur, and W. R. Wilson, 1992, “Potential to Sequester Carbon in Canadian Forests: Economic Considerations,” *Canada Public Policy*, 18:127-138.
 47. van Kooten, G. C., B. Stennes, E. Krcmar-Nozic, and R. van Gorkom, 2000, “Economics of Afforestation for Carbon Sequestration in Western Canada,” *The Forestry Chronicle*, 76: 165-172.
 48. Wangwacharakul, V. and R. Bowonwiwat, 1995, “Economic Evaluation of CO₂ Response

- Options in the Forestry Sector: the Case Thailand,” *Biomass Bioenergy*, 8:293-308.
49. Xu, D., 1995, “The Potential for Reducing Atmospheric Carbon by Large Scale Afforestation in China and Related Cost/Benefit Analysis,” *Biomass and Bioenergy*, 8: 337-344.
50. Zheng, C. L., 1994, “Forest Resource Utilization and Sustainability-a Study on Optimum Forest Rotation,” *Quarterly Journal China Forestry*, 27:63-74.
51. Zheng, C. L., 2000, “An Analysis of Reforestation Cost and Decision of Timber Harvest,” *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 33:81-87.

On the Cost-Benefit Analysis of Carbon Sequestration under Considering Opportunity Cost

Jiunn-Cheng Lin* and Wan-Yu Liu**

Abstract

In order to reduce the negative impact due to the climate change resulting from increasing greenhouse gases, many countries in the world have actively adopted various kinds of approaches to reduce greenhouse gas emissions. Among those the forest carbon sink/sequestration has been regarded as one of the strategies which can provide the lowest costs for the reduction of emissions. Since forests are increasingly recognized as playing a key role in reducing carbon dioxide, forest carbon sinks have been included in Kyoto protocol as one of the mechanisms in mitigating climate change. According to Kyoto Protocol Article 3.3 and 3.4, the production of CO₂ sequestration and emission due to the strategies, which includes increasing afforestation, reforestation, deforestation (ARD) and improving forest management, can be merged to the amount of national emissions reduction. Concerning the economics of a country, forest management is a good cost-effective strategy for carbon reduction. The aim of this paper is to assess the economic cost and benefit of carbon reduction under China Fir plantation at Lien-Hua-Chih. In this research, we found that profits from harvest of timber have not been taken into consideration as part of the opportunity costs of carbon sequestration in

* Associate Researcher and the Chief of Center, Taimali Research Center, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

** Assistant Professor, Department of Applied Natural Resources, Aletheia University, Tainan, Taiwan. Corresponding Author. Tel: 886-9-14043000, Email: nellyliu@gmail.com.

previous studies, which may have caused underestimation of the carbon sequestration cost of human-made forest plantations. Based on the results of empirical simulation conducted in this research, a 20-year-old China Fir plantation yields a carbon sequestration volume of 54.22 tons after the opportunity costs are taken into consideration. Each hectare yields a present value of benefit of NT\$54,154.85 from carbon sequestration and NT\$225,931.69 from timber harvest. And each hectare incurs an accumulated carbon sequestration cost of NT\$226,808.69, and the unit carbon sequestration cost comes to NT\$4,183.28/ton. After factoring in the opportunity costs of carbon sequestration, the average unit cost of carbon sequestration rises from NT\$2,253.78 to NT\$2,866.42. To be thorough, this research brought in three additional carbon release ratios to calculate the unit carbon sequestration cost. Results show that, under the configuration of dispersed price function, the per-ton cost of carbon sequestration falls between NT\$362 and NT\$3,279.25, and when configured under continuous price function, the per-ton carbon sequestration cost falls between NT\$898.20 and NT\$5,309.86. Estimates derived from this research are generally consistent to the carbon sequestration costs estimated in the previous studies published internationally.

Keywords: Kyoto Protocol, Carbon Sequestration, Cost-Benefit Analysis, Opportunity Cost

JEL Classification: Q15, Q23, Q28