

I、研究動機與目的

減少溫室氣體含量已成為全球重視的議題，有關節能減碳的標誌及低碳樂活的標語隨處可見，各國政府正積極考量相關政策來減少溫室氣體的排放量，像是監管、可轉讓的排放許可證、財政激勵措施（例如：稅及補貼）、鼓勵大眾交通及環保載具、綠色能源和森林碳匯，其中森林碳匯被認為是未來經濟可行且成本較低的重要減緩措施。森林資源是有效防止全球暖化的工具，當人類將森林破壞後一方面加重溫室效應，加速全球氣候暖化，另一方面減少吸收二氧化碳的數量，所以損毀或不合理使用森林資源是對環境的嚴重破壞，亦是全球氣溫上升的一大主因。京都議定書已經將森林碳吸存功能納入一國之溫室氣體減排淨值中計算，明訂 1990 年以後進行之新植造林（afforestation）及更新造林（reforestation）扣除毀林（deforestation）所得之二氧化碳吸存、排放淨值，和加強森林管理所額外增加的碳吸存量皆可併入該國之減排量值計算。因此，增加造林面積與促進森林永續經營策略之方法，為降低二氧化碳排放量的策略之一。

森林碳匯是指森林吸收大氣中的二氧化碳並將其固定在植被或土壤中，從而降低二氧化碳在大氣中的濃度，因此森林可視為陸地生態系統中最大的碳庫，對於減緩氣候變化有十分重要的功用，許多國家及國際組織正積極研究利用森林碳匯應對氣候變化的可行性。

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。林木及綠色植物行使光合作用為森林碳儲存的典型機制，從大氣中吸收二氧化碳並轉化成有機碳的型式累積儲存在植物體中，並排出氧氣；根據統計，植物體生物量增加 1 公噸，需要 1.6 公噸的二氧化碳，同時釋放 1.2 公噸的氧氣，而固碳量約為 0.4 公噸，所以森林至少能在短期內發揮減緩全球氣候變

化的重要作用；然而，森林火災、林地轉換為農地或裸露地、以及伐採收穫等原因皆會釋放二氧化碳回大氣中；另外，被收穫的林木經各種加工製造成為林產品，原先儲存的碳量可能有部分能移轉至這些林產品中，但也會因林產品的衰壞而再次以二氧化碳的型式進入大氣。因此，為了因應氣候改變，各國政策已逐漸聚焦在森林的碳吸存利益及碳釋放的成本中。

由於森林碳吸存的多寡乃取決於森林的淨生長量，在未受干擾的天然林雖可吸收大量的二氧化碳，但森林群落中其他動、植物和微生物的呼吸量也大，且枯枝落葉大量分解消耗有機質也會釋放出二氧化碳，因此天然林吸收和釋放的二氧化碳基本上是平衡的（Kimmins, 1987），加上天然林的林相不齊，某些樹種生長慢、蓄積量低且生產力低落，基於上述原因，天然林的碳吸存量有限，於是本研究希望透過研擬人工林經營管理策略，在適地適木的原則下選擇適當的樹種栽種，以增加森林碳量的儲存。

因為林木生長量會影響儲存的碳量，所以森林的砍伐時點變得十分重要，考慮社會效益極大化下的森林收穫年限，稱之為森林的最適輪伐期。許多因素皆會影響森林的最適輪伐期變化，像是市場價格、折現率、碳效益、反照率、及森林火災風險皆會影響林主的砍伐時點決策。

另一方面，隨著對全球氣候變化研究的深入，地球科學領域的科學家們發現地表反照率在氣候變化中也扮演著重要的角色。地球表面複雜多變，使得地表反照率差別很大，高的地表反照率可以反射較多的太陽輻射能回外太空，從而減緩地球增溫，因此，許多地科學者也正著手研究土地利用對氣候變化的影響。而人為改變大尺度的植被特性可影響地表反照率的改變，導致短波輻射收支擾動進而影響輻射驅動力（Radiative Forcing，以下簡稱 RF），所謂輻射驅動力是一個定量比較人為和自然作用力對氣候變遷影響的概念，其定義為對流層頂的淨輻射通量之改變量，其測量單位為 Wm^{-2} 。Thompson、Adams and Sessions（2009）提出因土地利用改變導致地表反照率產生變化進而影響氣候改變，可能會減少或抵消陸域生態系統的碳封存效益，若僅考

慮森林固碳作用的效益而忽略地表反照率的影響可能明顯高估森林碳吸存的效果，其研究探討固碳量和反照率效應皆可藉由輻射驅動力來衡量地球氣候的影響，森林透過固碳作用相當於負的輻射驅動力，也就是降低二氧化碳含量，使得溫室效應降低；反之，因減少地表反照率而導致正的輻射驅動力，亦即森林的低反照率特性將使地表吸收更多太陽輻射使得溫度上升。因此，地表反照率的細微變化也會影響到地球氣候系統的能量收支平衡，進而引起全球氣候變化。

綜上所述，溫室氣體含量的多寡及地表反照率的差異皆是影響全球氣候變化的重要因素。國外已有許多文獻 (Klemperer, 1977; Chang, 1982; 1983; Van Kooten、Binkle & Delcourt, 1995; Koskela, 1989; Koskela & Ollikainen, 2000) 是針對單一因素對森林最適輪伐期影響的研究，較少文獻為多重影響的探討，僅有 Thompson、Adams 與 Sessions (2009) 首度將森林的固碳作用與低反照率特性之兩種外部性一同探討，考慮在碳效益與地表反照率的雙重影響下對寒帶森林 (British Columbia) 輪伐期的影響。Bala *et al.* (2007) 的研究顯示，地表反照率在不同的氣候 (寒帶、溫帶與熱帶) 下有很明顯的差異。因此本文希望考慮森林碳吸存和吸收太陽輻射的雙重效益下 (負輻射驅動力)，再納入同樣對氣候變化有舉足輕重影響的反照率效應 (正輻射驅動力)，探討亞熱帶森林 (臺灣杉木) 最適輪伐期的變化，以期能更精確地了解不同區域的森林對氣候暖化的助益。

II、文獻探討

2.1 森林的二氧化碳吸存量研究

自 1997 年京都議定書通過，凡 1990 年以後所進行之造林、再造林及森林砍伐所吸收或排放的二氧化碳淨值，皆可併入溫室氣體排放減量計算，自

此之後，森林碳吸存的功能即備受世界各國重視。國外森林資源二氧化碳吸存量之研究：Sedjo（1989）試算造林對二氧化碳的吸存量，在普通人工林每公頃年平均生長量為 15 立方公尺的林地，每年每公頃可吸存 14.3 公噸的二氧化碳。Dixon *et al.*（1993）估算不同森林經營方式之二氧化碳吸存量，當輪伐期為 50 年，折現率為 5%時，在熱帶地區，經天然更新之林地二氧化碳吸存量為每公頃 715 公噸，農地造林之林地二氧化碳吸存量為每公頃 220-458.3 公噸，砍伐跡地造林之二氧化碳吸存量為每公頃 238.3 公噸；溫帶地區之荒地造林或新植造林二氧化碳吸存量為每公頃 440 公噸，砍伐跡地造林二氧化碳吸存量為每公頃 205.3 公噸。Maclaren（1996）分析紐西蘭人工林地二氧化碳的吸存量，當輪伐期為 20-50 年時，平均每公頃二氧化碳的吸存量約在 264-685.6 公噸之間。

而國內的森林資源二氧化碳吸存量研究：林俊成、李國忠與林裕仁（1999）估算林齡為 7-81 年生之柳杉人工林二氧化碳吸存量為每公頃 591.2 公噸。李國忠、林俊成與陳麗琴（2000）以林業試驗所六龜試驗林台灣杉人工造林地 10 處，推估台灣杉人工林的碳吸存量，不同造林地每公頃碳總吸存量在 32.6-133.1 公噸間，平均每公頃為 76.8 公噸，由於造林地之林木尚未達成熟的狀態，仍持續生長中，因此如能提高林地生產力，將可提高碳的吸存。

故林木可用來吸存及貯存二氧化碳，比起調整產業結構來減量二氧化碳更為有效率，對國家整體經濟的衝擊較小。而林木的碳吸存能力，視林木的生長環境和枯死情形而異，也依樹種組成、林齡結構、森林的健全情況等有所不同。

2.2 森林的最適輪伐期研究

森林最適輪伐期的評估最初是由 Faustmann（1849）透過木材收益使林地期望值大化的計算方式，確立了森林最適砍伐時點的決定。Hartman（1976）延伸 Faustmann 模型，除了木材收益之外，將森林所帶來的外部效益也納入

模型中考慮，這些外部效益可能為水土保持、遊憩效益（如打獵、健行）或生態保育等，但 Hartman 未將理論模型數據化且無實證研究結果，後來某些學者運用 Hartman 模型理念來探討碳價格對最適輪伐期的影響和碳吸存的供應量。Englin 與 Callaway（1993）研究碳價格對 Douglas Fir 最適輪伐期的影響，使用的碳價格範圍從每公噸 10 美元到每公噸 200 美元之間，作者發現擁有碳價格的輪伐期較傳統的 Faustmann 輪伐期長，且輪伐期延長期限與碳價格呈現正相關；Plantinga 與 Birdsey（1994）做了相似的理論研究，結論為若只考慮碳效益則輪伐期為無限期，若同時考慮碳和木材的效益則輪伐期會介於只考慮碳效益或只考慮木材效益的輪伐期之間。Van Kooten、Binkley 與 Delcourt（1995）和 Hoen 與 Solberg（1997）分別對加拿大西部森林和 Scandinavian 森林作實證研究，皆發現類似的結果，證實加入碳效益後將延長森林最適輪伐期。

為了激勵林主延長森林之最適輪伐期進而提升森林的碳吸存量，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。目前世界各國已經開始研擬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。

Van Kooten、Binkley 與 Delcourt（1995）考慮碳補貼和碳稅對森林最適輪伐期的決定有何影響，地主因碳可固存在樹木中受到補貼，而因收穫所造成的碳排放量被課稅，換句話說，補貼用來鼓勵林主植樹和造林以促進樹的成長，而稅收則是用來阻止樹木收穫，亦即延後釋放二氧化碳碳貯存到大氣中。Sedjo 與 Solomon（1989）提出維持木材原始狀態所製成的木製品，可使一部分的碳轉存於木製品中而不會釋放到大氣中，代替森林封存部分的碳，若林木收穫後用於生產可封存碳的相關木製品便可獲得補貼額，因此，Stainback 與 Alavalapati（2002）除了考慮林木中的碳吸存量，也納入儲存在木製品中碳量來計算補貼額，文中提出碳補貼和碳稅的政策可在兩方面增加林分的固碳量，其一為延長輪伐期的年限和增加立木的生物量，另一

個則是增加生產壽命較長木製品的比例，因為木製品的碳貯存量會隨著該物體的使用期限慢慢減少。

因此，上述文獻皆指出，建立經濟誘因機制將碳價值納入模型中考慮可得出延長森林輪伐期的結論。

2.3 反照率效果 (The Albedo Effect)

地表反照率表示地球表面對太陽輻射的反射能力，即為從地球表面反射出的總能量與抵達地球的總能量之間的比例，決定著地表與大氣之間輻射能量的分配過程，是影響地球氣候系統的關鍵因素。反照率的數值介於 0 和 1 之間，數值 0 表示不存在任何反射現象，數值 1 則表示所有的能量都被完全反射出去。

Curry、Schramm 與 Ebert (1995) 透過雪與海水的反照率特性解釋了地表反照率對全球氣候變化的影響，在全球變暖的情況下，冰雪覆蓋融化、減少，使地表反照率降低，地球表面吸收更多的太陽能，從而進一步加速地球變暖；相反地，若全球氣溫降低，則冰雪覆蓋增加，地表反照率升高，更多的太陽輻射被反射回太空中，地球溫度便進一步降低。Betts (2000) 研究發現森林的地表反照率明顯低於農田，尤其是有積雪覆蓋的季節，因為森林冠層顏色一般較農田深，且森林的粗糙度也大於農田。當積雪覆蓋時，森林可能大部分裸露，而農田往往完全被積雪覆蓋，由於大量反射光會在森林冠層裡散射，所以森林反照率將低於農田。鮑平勇等 (2007) 透過遙感方式得到不同地物反照率的大小，其中裸岩的反照率最大依次為耕地、河灘、居民地、草地、林地、裸土，而以水體的反照率最小。

近年來，反照效應已被納入森林固碳量的相關研究，其影響可能不同於以往純碳效益極大化的結果。最近的研究結果發現，由於森林的地表反照率遠低於其他土地利用類型，使造林區域的地表吸取更多的太陽輻射，反而加速氣候暖化。Betts (2000) 研究美國北方針葉林地地區造林活動對地表反照率

的影響，其估計溫帶及寒帶區域可耕地轉換成針葉林的反照率效應，觀察得出寒帶森林區域的短波輻射等值碳釋放量 (Emissions Equivalent of Short-wave Forcing, 以下簡稱 EESF) 價值最高，特別是積雪期間越長越有此特性，也就是說造林之前農地反而有較高的反射率且能反射更多的入射短波輻射，因此，降低地表反照率的暖化效應能夠抵消碳吸收產生的冷卻效應。

Bala *et al.* (2007) 模擬大規模砍伐寒帶、溫帶和熱帶的森林，結果得出寒帶地區森林砍伐導致氣候冷卻降溫，溫帶地區基本上沒有變化，而熱帶地區則導致氣候暖化，因此若在高緯度地區實施減緩氣候變化的造林項目可能無法達到預期的影響。Thompson、Adams 與 Sessions (2009) 研究在森林的固碳作用下，探討輻射驅動力對最適輪伐期的影響，其透過農地變更為造林地所產生的地表反照率改變，導致正輻射驅動力下的等值碳排放量模擬加上森林本身的碳吸存潛力，進而求算森林的最適輪伐期，並於 British Columbia 的沿海混合針葉林區域做輪伐期變化的實證研究。研究結果顯示，考慮正輻射驅動力後將縮短純碳效益的森林最適輪伐期，因正輻射驅動力等同於森林的碳釋放作用，對森林的固碳效益有抵減的效果。

因此，最近的新興研究表明，在寒帶和溫帶地區的森林（特別是造林），考慮純碳吸存的方法對封存二氧化碳和減輕氣候變化影響的能力被誇大了。在某些情況下，土地利用變化和地表反照率改變的影響，可能會導致造林項目適得其反，甚至導致局部暖化效應。

III、理論模型

3.1 The Faustmann Rotation (僅有木材收益)

最大林地期望值最早是由 1849 年德國學者 Martin Faustmann 提出，目標是要求得林地經濟租之極大化，又被稱為 Faustmann Model。假設林地一直被

用為生產林木，因林木留置在林地上時，林地就無法變成空地再次造林，而會影響下一次伐期的淨收益，在此情況下則不能只考慮單一的輪伐期，故在此考慮的是多次伐期。

舉例來說，若一個林地的輪伐期是 20 年，另一個林地的輪伐期是 30 年，若在 60 年之內，前者可以收穫三次，但是後者只能收穫二次，假使兩森林的單一輪伐期之淨現值相等，但以多次伐期而言，可明顯表示出林地租之淨值顯然輪伐期 20 年多於 30 年者，當林地被佔用時會產生機會成本，此機會成本就是經濟租。此模式表示如式(1)：

$$\begin{aligned} \text{Max } LEV(t) &= [pv(T) - c]e^{-rt}\{1 + e^{-rt} + e^{-2rt} + e^{-3rt} + \dots\} \\ &= \frac{[pv(T) - c]e^{-rt}}{(1 - e^{-rt})} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 LEV 被稱為林地期望值 (Land Expectation Value，以下簡稱 LEV)，是由每一伐採期的期初淨現值再折算成目前現值的總和； p 為木材之單位價格（為簡化模型，假設木材之單位價格 p 不隨時間改變）， T 為輪伐期長度， $v(T)$ 為在林齡為 T 年時砍伐之木材蓄積量， c 為造林成本（為簡化模型，假設造林成本 c 不隨時間改變）， r 為折現率。對式(1)作一階微分等於零求極值，即令 $dLEV(t)/dt = 0$ 可得：

$$pv'(T) = \frac{r[pv(T) - c]}{(1 - e^{-rt})} \quad (2)$$

將式(2)的兩邊同乘以 $(1 - e^{-rt})$ 可寫成：

$$pv'(T) = r[pv(T) - c] + rLEV \quad (3)$$

式(3)中， $pv'(T)$ 為森林多留一年所得之邊際生產收益 (Marginal Revenue of Product，以下簡稱 MRP)， $r[pv(T) - c]$ 為將森林資源多留一年之利息損失，而 $rLEV$ 為將森林資源多留一年之林地租支出，等號右邊即為森林資源多留一年之邊際成本 (Marginal Cost，以下簡稱 MC)。當 $MRP = MC$ 時，其 T 期即為追求永續森林資源經營之森林最適輪伐期。

3.2 森林最大多目標利用價值模型

若應用上節的森林經營原則，顯然對於原始森林的保留極為不利，因為多數天然原始林已經達到生態學上所謂的極相（climax），其林木蓄積的增長已呈停滯，故必須砍伐更生；但就社會整體而言，森林並不只是能生產木材收益，原始的老齡林雖然生長停滯，仍有其外部效益，如水土保持、景觀和生態保護等價值，若一旦砍伐，這些森林蓄積的非木材生產價值亦隨之消逝。而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，一般稱為森林的最大多目標利用（multiple-use）價值模式，其目標函數為求多次輪伐期之森林多目標利用價值最大化。

本研究延伸 Hartman 所提出的最大多目標利用價值模式，在林地期望價值方面，除考慮木材收益與碳效益外，亦考慮森林的輻射能量收支來決定最適砍伐時點。理論模型參考自 Thompson、Adams 與 Sessions (2009) 之最適輪伐期模型，將碳效益與地表反照率變化所產生的正輻射驅動力納入傳統 Faustmann Model 中，但其只考慮了森林加強輻射支出的效果，尚未考慮森林輻射收入的面向，因此，本研究加入森林吸收太陽輻射作為光合作用所需之修正，並考慮林木砍伐時並非將所有二氧化碳釋放回大氣中，可能有部分比例的二氧化碳可留存在木製品中，故額外加入碳釋放比率，進而推出林地期望值極大之最適輪伐期，其模型如式(4)：

$$Max_T LEV_{tecs} = \frac{[pv(T)-c]e^{-rT} + p_c \alpha \int_0^T v'(t)e^{-rt} dt \pm p_c \int_0^T A'(t)e^{-rt} dt - p_c [\alpha \theta v(T) \pm A(T)]e^{-rT}}{1 - e^{-rT}} \quad (4)$$

其中 p ：木材市場價格，

$v(t)$ ：在林齡為 t 年時的木材蓄積量，

c ：造林的總成本，

r ：折現率，

p_c ：碳價格（碳稅/補貼），

α ：碳轉換因子，

θ ：碳釋放比例，

$A(t)$ ：單位面積累積之等值碳量。

式(4)可區分成四部分解釋： $[pv(T) - c]e^{-rT}$ 為林木砍伐之木材淨收益， $p_c \alpha \int_0^T v'(t)e^{-rt} dt$ 為碳吸存收益之淨現值， $p_c \int_0^T A'(t)e^{-rt} dt$ 為森林輻射能量收支等值碳量之淨現值， $p_c [\alpha \theta v(T) \pm A(T)]e^{-rT}$ 為森林在 T 期收穫後所產生的碳釋放量及輻射能量收支變化的等值碳量估計，而 LEV 下標的 $tecs$ 表示林地期望值考慮了輻射能量收支的總等值碳量。由於本研究模擬森林地區降低地表反照率後導致正輻射驅動力而引發類似碳釋放的效果，另一方面模擬植物吸收太陽輻射導致負輻射驅動力而引發類似碳吸存的效果，因此，有關輻射能量收支的等值碳量計算尚無法確認正負符號，端視兩者效果的大小而定。將式(4)作整理並簡化該式可得（簡化過程請參考附錄 I）：

$$Max_T LEV_{tecs} = \frac{[p + p_c \alpha (1 - \theta)]v(T)e^{-rT} - ce^{-rT} + rp_c \alpha \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \pm rp_c \int_0^T A(t)e^{-rt} dt}{1 - e^{-rT}} \quad (5)$$

對式(5)作一階微分等於零求極大值，可改寫成：

$$\begin{aligned} & [p + p_c \alpha (1 - \theta)]v'(T) + rp_c [\alpha v(T) \pm A(T)] \\ &= \frac{r}{(1 - e^{-rT})} \left[[p + p_c \alpha (1 - \theta)]v(T) - c \right. \\ & \quad \left. + rp_c \alpha \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \pm rp_c \int_0^T A(t)e^{-rt} dt \right] \\ &= r\{[p + p_c \alpha (1 - \theta)]v(T) - c + LEV_{tecs}\} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)的等號左邊為森林多留一年所得之邊際生產收益，包含增生的木材生長

收益及因延遲木材收穫而不被課碳稅的利息價值；等號右邊則是森林多留一年之邊際收入成本，是由放棄土地和木材價值的利息損失所組成。

若僅考慮碳效益的情況下，則式 (6) 之一階條件將變化為式 (7)，無需做輻射能量收支的調整，亦即。Van Kooten、Binkley 與 Delcourt (1995) 所提出森林碳稅/補貼機制的最適輪伐期模型，其一階條件之數學式如式 (7)：

$$[p + p_c \alpha (1 - \theta)] v'(T) + r p_c \alpha v(T) = r \{ [p + p_c \alpha (1 - \theta)] v(T) - c + LEV_{cs} \} \quad (7)$$

觀察式 (3) 與式 (7) 可發現考慮碳效益時，將提供經濟誘因使得林木可保留較長的時間不被砍伐，其因為延遲課森林收穫時的碳稅而產生額外利息收益。而式 (6) 透露出不同的訊息，由於本研究考慮輻射能量收支所帶來的等值碳收支量，因此可能增強輪伐期延長的效果，也可能抵減碳效益所導致輪伐期延長的效果。

IV、實證結果分析

4.1 實證樹種介紹

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 為杉科植物，分布於中國長江以南各省，相當於東經 102°~122°、北緯 22°~34° 之間，是中國栽培面積最廣的樹種之一，據中國第七次森林資源清查結果 (2004 年~2008 年)，杉木人工林面積高達 853.86 萬公頃，占全國人工林面積的 21.35%，蓄積量為 62,036.45 萬立方公尺，木材產量約占商品材的 31.64%，杉木人工林不管是造林面積、蓄積量或林業產值均居主要造林樹種的前茅，而台灣也引進栽培於全島 500~1,800 公尺之山區，2005 年調查國有林人工林，杉木類約占 20,800 公頃，由於其生長快、樹齡長，且材質緊密優良為亞洲主要的木材來源，目前主產於中國，為重要的造林樹種之一。

若將整個杉木分佈區分為 3 個地帶：北帶相當於植被區的北亞熱帶，為杉木分佈的北部邊緣；在適宜的立地條件下，20 年生杉木林年平均生長量每公頃可達 6.0~7.5 立方公尺。中帶相當於中亞熱帶，其東部和中部都是杉木的中心產區，如貴州東南部、湖南西南部、廣西北部、廣東北部、江西南部、福建北部、浙江南部等都是歷史上杉木的著名產地，20 年生的林分平均年生長量每公頃可達 9~11 立方公尺，而一些小面積豐產林，則可達 15~30 立方公尺。南帶相當於南亞熱帶，為杉木分佈的南部邊緣，這裡杉木生長較差，每公頃只生長 4~8 立方公尺。

林分生長發育可分為 4 個階段：幼樹階段（2~4 年生）：栽後一、二年為恢復期，而後根系大量分生，主梢生長逐漸旺盛，樹冠開始擴展，初具樹形；速生階段（5~15 年生）：樹高直徑生長進入旺盛時期，根系往深度和廣度發展，幼林開始鬱閉；幹材階段（15~20 年生）：材積生長迅速，心材比例增加，樹高直徑生長減慢，自然整枝強烈；成熟階段（21~30 年生）：樹高生長下降，材積生長趨於平穩且已達成熟，心材比例顯著增加，材質緻密堅實，此時即可採伐利用。

4.2 變數設定與估計

4.2.1 杉木成長收穫函數

若欲計算出森林最適輪伐期，首先須建立該樹種之成長收穫函數。陳麗琴與黃進睦（1992）調查台灣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，僅以林齡變化作為獨立變數，得出杉木單位面積材積與林齡關係之函數型式，然而其所用的每公頃材積數據僅有樹齡 8-20 年，由於考慮到樹齡 8-20 年之杉木尚在速生階段，以此估計恐會高估成熟階段的材積數，因此本研究參考劉浚明與鍾旭和（1993）對台灣杉人工林生長收穫之函數：

$$v(t) = 578.6851(1 - t^{-1.5402})^{54.3344} \quad (8)$$

其中 $v(t)$ 為林齡 t 年之林木材積 (m^3/ha)， t 為林齡 (年)，此非線性材積函數可估算出杉木在不同林齡時之每公頃材積量。

4.2.2 木材單位價格之估計

林國慶與柳婉郁 (2007) 依循陳麗琴 (1987) 原木價格資料 (第 8 年至第 20 年)，建立原木價格函數為 $p(t) = 352.11 + 242.75t - 5.284t^2$ ， $R^2 = 0.9988$ ，其中 $p(t)$ 為原木價格函數 (元/立方公尺)， t 為林齡。然而在此迴歸式中，當林齡 $t > 23$ 之後， $p(t)$ 開始遞減，此較為不合理，故假設原木價格在林齡 23 年之後皆維持在第 23 年的價格水準，以更符合實際狀況。另外由於上述所估計的原木價值為 1991 年的資料，故本研究考慮原木價格上漲率，由林務局編印之 2011 年林業統計可知從 1991 年至 2011 年之原木價格上漲率約為 28%，因此本文將由迴歸式所計算出來各林齡之價格乘以 1.28 來估計目前之原木價格水準。將杉木樹齡與各單位價格資訊歸納如表 1：

表 1 杉木之林齡、材積與年度原木價

項目	樹齡 (年)			
	8	12	16	20
材積 (m^3/ha)	86.86	114.75	153.23	197.06
1991 年原木價 (元/ha)	168,475.00	288,812.00	439,690.00	612,060.00
1991 年原木價 (元/ m^3)	1,939.62	2,516.88	2,869.48	3,105.96
2011 年原木價 (元/ m^3)	2,482.71	3,221.61	3,672.93	3,975.63

資料來源：1991 年原木價由林國慶與柳婉郁 (2007) 統整而得；2011 年則為本研究計算所得。

依照林務局木材市價資訊系統公告之價格，將杉木近十年內的價格加以平均得到 3,940 元/ m^3 。兩相比較之下，本研究假設樹齡 t 小於 20 (未達伐木年齡) 木材價格隨樹齡增加而遞增，而樹齡 t 大於 20 後其木材價格 (不隨時間變動) 為 4,000 元/ m^3 。

4.2.3 伐採成本及造林成本

造林成本包含整地、新植、撫育、補植及管理等項目，根據劉浚明(1997)的造林成本估計，可分為育苗成本、出栽成本及除草成本，由於台灣有獎勵造林計畫，林農可向林務局申請種苗配撥，若苗木是由林務機關提供，則育苗成本可視為 0；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。

4.2.4 林木碳吸存效益函數之估計

對於林木固定碳素效益之估算，自 1990 年以來各國之林業部門已掀起估算森林資源碳量貯存與吸存能力之工作，以期獲得較準確的估算結果，作為未來進行碳交易機制之計量基礎。在推估林木二氧化碳吸存量之相關研究中，多採用 IPCC 所提出之二氧化碳吸存轉換公式估算之。此公式係將林木材積乘以木材比重求出林木生物量，再利用林木生物量乘以二氧化碳含量轉換係數求出所能吸存之二氧化碳吸存量。公式如式 (9)：

$$C_{plant} = V_{stem/ha} \times V_{whole/stem} \times W_0/V_g \times C_{con} \times (CO_2/C) \quad (9)$$

其中 C_{plant} ：林木每公頃二氧化碳吸存量， $V_{stem/ha}$ ：每公頃林木材積， $V_{whole/stem}$ ：全株材積與幹材材積之轉換係數， W_0/V_g ：重量與材積之轉換係數， C_{con} ：碳含量轉換係數， CO_2/C ：二氧化碳與碳轉換係數， CO_2 分子量為 44， C 分子量為 12。

由於不同樹種會有不同的 $V_{whole/stem}$ 、 W_0/V_g 、 C_{con} ，因此本文針對杉木蒐集實證資料，引用鄭欽龍（2010）研究計畫所蒐集之文獻結果，並將杉木的各項轉換係數整理如表 2：

表 2 杉木之材積與碳轉換係數

項目	係數	文獻
全株材積與幹材材積之轉換係數	1.68	洪富文、孫正春與黃松根 (1985)； 秦建華與姜志林 (1996)；羅天祥與 趙士洞 (1997)
重量與材積之轉換係數	0.35	馬子斌等 (1992)
碳含量轉換係數	0.48	林俊成等 (2002)

資料來源：整理自鄭欽龍 (2010) 及以上所列文獻。

4.2.5 碳釋放比率與折現率

林木生長期間會吸存大氣中的二氧化碳，並持續貯存於林木中，直到伐木後，部分吸存的二氧化碳會陸續釋放回大氣。若在伐木後，部分木材被用來作為燃料，則所貯存的碳會釋回大氣中，其他則隨木製品繼續被貯存，若干年後，隨著木製品的衰壞，其所貯存的二氧化碳也會一點一滴被釋出。在森林生長的階段，林主可由其林木所吸存的碳量獲取收益，在收穫伐木時，當然也須為了釋放的碳量做出補償。而在本研究中僅考慮伐木後未被繼續貯存的碳量做補償，無需考慮木製品陸續釋放的二氧化碳量。由於缺乏杉木用途比例的資訊，因此本研究引用柳婉郁、盧又銘與林國慶 (2009) 的三種碳釋放比率，模擬不同的碳釋放比率對於最適輪伐期之影響。

定義 θ 為砍伐林木後的碳釋放比例，釋放比率因樹種不同而不同，也因砍伐後所生產木製品的利用方式而有所不同，由於釋放比率必介於 0 至 1 之間，因此考慮下列三種碳釋放比率：

- (1) $\theta=1$ ：表示伐木後所有碳立即釋放回大氣中。
- (2) $\theta=0.7$ ：表示有 30% 的碳留存在木製品，70% 的碳釋放回大氣中。
- (3) $\theta=0.3$ ：表示有 70% 的碳留存在木製品，30% 的碳釋放回大氣中。

因林業投資時間較長，且其生產過程連續不間斷，因此利率對林業投資具有顯著的影響。而本研究所設定之折現率 (Discount Rate) 一致為 5%。

4.2.6 森林的輻射能量收支與等值碳量估計

綠色植物經由氣孔吸收二氧化碳和由根部吸取水，並透過陽光的能量來進行光合作用，獲得生長發育必需的養分。因此本研究將森林可吸收二氧化碳和太陽輻射的特性視為負的輻射驅動力，可減緩地球溫度上升；另一方面，由於造林會降低地表反照率，使得森林較一般農地吸收更多短波輻射形成正的輻射驅動力。Betts（2000）整合輻射驅動力的概念來表達森林固碳和降低地表反照率相對應於氣候的影響，將農地轉變為林地的地表反照率差異改以等值碳釋放量的變化來表示。

輻射驅動力與大氣中二氧化碳濃度變化之間的關係（Myhre *et al.*, 1998）可由式 (10) 表示：

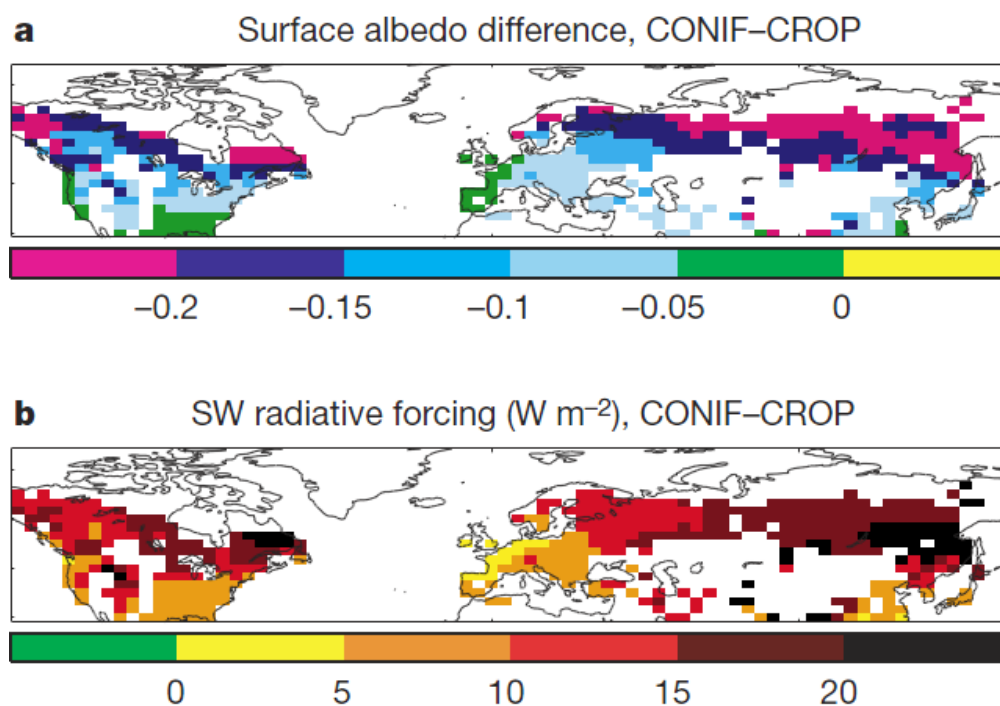
$$F = 5.35 \ln(1 + \Delta C / C_0) \quad (10)$$

其中 F 為輻射驅動力； ΔC 表二氧化碳濃度變化量； C_0 為基準年的二氧化碳濃度。再將大氣中二氧化碳濃度變化轉換為陸地的碳存量變化：

$$\Delta C_T = 2 \left(\frac{M_c}{M_a} \right) m_a \Delta C / C_0 \quad (11)$$

其中 ΔC_T 表陸地碳存量變化； M_c 為碳原子量； M_a 為乾空氣的分子量； m_a 為大氣質量；由於空氣中二氧化碳的排放量僅占原始排放量的一半，因此乘以 2 才能更接近原始排放數量。

根據 Betts（2000）的研究顯示，溫帶地區由農地轉換為林地的地表反照率約為 -0.04 至 -0.15 之間，中亞地區的輻射驅動力約為 3 至 10 Wm^{-2} （如圖 1），其研究假設有關於反照率的等值碳釋放量是基於一個森林輪伐期內所達到的反射率參數來估計，已知中國地區的短波輻射等值碳釋放量（EESF）約為每公頃 60 公噸。



資料來源：Betts (2000)。

註 a：模擬農地轉林地 (CONIF-CROP) 的年平均地表反照率差異；

註 b：由於地表反照率改變引起對流頂層短波輻射驅動力的變化。

圖 1 造林對地表反照率及短波輻射驅動力的影響

另一方面，日光中可用於光合作用的只有波長 400~740 nm 範圍之可見光，稱為光合有效輻射 (photosynthetically active radiation)，Pietro (2009) 提出以整年而言，在亞熱帶 (南北緯 20°~40°) 地區平均地表接受的太陽能約 $240 Wm^{-2}$ ，而光合有效輻射能量大約只佔太陽光能中的 43%，實際上，光合作用對日光能量的利用率並不高，以照射在葉片上的日光能量，植物大約可吸收 80%，剩下 20% 的能量大都經由反射或漏光而散失。植物吸收的能量中，有一部分轉變為熱，大部分於蒸散作用中消耗，僅有很小部分約 0.5 到 3.5% 的能量用來進行光合作用，因此光合作用的效率可以說是非常的低。依據上述所收集的訊息，且進行光合作用的能量採中間值 2% 計算，可假設太陽

輻射提供給森林作光合作用的能量約為 $240 (Wm^{-2}) \times 0.43 \times 0.8 \times 0.02 = 1.65 (Wm^{-2})$ ，若杉木之平均輪伐期為 25 年，則輪伐期期間供光合作用之總太陽輻射為 $41.25 (Wm^{-2})$ 。而森林與農地吸收太陽輻射量的差異，則以植物體的淨初級生產力 (Net Primary Productivity, 以下簡稱 NPP) (註 1) 來比較，陳利軍等 (2002) 估算中國植被之單位面積平均淨初級生產力，其中針葉林為 $1031.92 (g C/m^2)$ 、農地為 $891.18 (g C/m^2)$ ，粗略估計其淨初級生產力的差異為 $140.74 (g C/m^2)$ ，亦即針葉林比農地約多吸收 13.6% 之能量， $41.25 (Wm^{-2}) \times 0.136 = 5.6 (Wm^{-2})$ ，若其他條件不變，藉由式 (9)、(10) 可推算出中國地區針葉林光合作用較農地多吸收太陽輻射能的等值碳吸存量約為每公頃 50 公噸。

本研究假設森林的輻射能量收支強度會隨著樹木的生長變化量而變動，亦即幼齡林的輻射能量收支能力較弱，成熟林的輻射能量收支能力較強，且假設上述之輻射驅動力模擬等值碳量皆為一個森林輪伐期內的估計，因此本研究將杉木自身的碳吸存能力和正負輻射驅動力所模擬的等值碳量比較，詳如表 3：

表 3 杉木碳吸存量和模擬等值碳量的比較

單位： $t C ha^{-1}$				
成熟林的平均 碳吸存量	等值碳釋放量	等值碳吸存量	淨碳存量變化	比例 ($\frac{\text{淨碳存量變化}}{\text{成熟林平均碳吸存量}}$)
110	60	50	100	0.9

資料來源：本研究。

註：以杉木樹齡 21-30 年的碳吸存量來計算成熟林之平均碳吸存量。

以森林的輻射能量收支效益來看，與農地相較之下，光合作用多吸收的太陽輻射小於減少地表反照率的輻射驅動力，且經計算過後，可得知若將等值碳量納入考慮，杉木之淨碳吸存量約佔原始碳吸存量的 0.9 倍，使森林的額外碳效益效果稍減。

4.3 實證模擬結果與分析

4.3.1 碳價格與最適輪伐期的關係

根據上述之變數設定與估計，可計算出 Faustmann Rotation 為 20 年，若將碳效益納入模型中考量，可延長輪伐期，而可將碳效益納入森林的輪伐期中考慮，是因林木吸存的碳量有價值，亦即賦予碳價格使之能量化計價，因此碳價格的多寡將影響輪伐期的變化。

根據歐洲能源交易所 (European Energy Exchange) 的統計資料顯示，從 2005 年開始碳價格從 20 歐元 (約新台幣 800 元) 左右上升到 32.65 歐元 (約新台幣 1,300 元)，然後隨著 2008 年金融海嘯衝擊歐洲經濟，碳價格就一路下滑，到 2013 年已來到 5 歐元 (約新台幣 200 元) 左右 (Thomson Reuters, 2015)。由於歐盟委員會規定，在試運行階段，企業每超額排放 1 噸二氧化碳，將被處罰 40 歐元 (約新台幣 1,600 元)，因此碳交易價格將不會超過 40 歐元。若根據歐盟排放交易體系 (European Emissions Trading Scheme, 以下簡稱 EUETS) 規定，未來罰款額將提高至每噸 100 歐元 (約新台幣 4,000 元)，則碳交易價格最高也有可能接近每噸 100 歐元的設定。在考慮碳價格的變動區間及模擬結果下，表 4 顯示碳價格區間與森林最適輪伐期之間的變化。

表 4 碳價格與輪伐期的變化關係

碳價格 (元/公噸)	0-500	1,000-2,000	2,000-3,000	3,000-4,000
輪伐期 (年)	20	21-22	22-36	36-48

資料來源：本研究整理。

由表 4 可看出當碳價格低於 500 元，林主並不會延長輪伐期，而當碳價格大於 2,000 元以上時，輪伐期才會有顯著增長的趨勢。若希望杉木的最適輪伐期有顯著延長，且政府選擇採取碳補貼/稅的誘因機制，如何在碳價格與二氧化碳期望吸存量之間取得平衡，相關單位應謹慎評量。

4.3.2 碳效益、輻射能量收支與碳釋放比率對最適輪伐期的影響

以下針對「僅有木材收益」、「木材和碳效益」、「木材、碳效益及輻射能量收支等值碳量」三種情境對最適輪伐期之影響進行模擬分析，由於本研究之木材價格採實際市場價格每立方公尺 4,000 元，為了瞭解碳價格低於木材價格與碳價格高於木材價格兩種情況下對延長最適輪伐期之差異，因此以 4,000 元為基準，左右各採兩階段的 1,000 元差額，故表 5 的碳價格(元/公噸)分別採用 2,000、3,000、4,000、5,000 及 6,000 元的級距(由於碳價格高於 4,000 元/公噸之機率不大，因此 5,000 及 6,000 元的級距，僅供比較之用。)，來區分不同碳價格對最適輪伐期的影響程度，並分析不同的碳釋放比率是否會進一步影響輪伐期的變化，如表 5。

由表 5 可知，「僅有木材收益」之最適輪伐期為 20 年，若將木材價格固定為 4,000 元，則輪伐期會縮短為 18 年，然而考慮到未達成熟階段的木材其價格應較為低，因此本研究設定樹齡 $t < 20$ (未達伐木年齡)木材價格隨樹齡增加而遞增，而樹齡 $t > 20$ 後其木材價格(不隨時間變動)為每立方公尺 4,000 元，以期更符合實際狀況。

在「木材和碳效益」的情況下，最適輪伐期會增加，然而輪伐期延長程度關係到碳價格的多寡：當碳價格低於 500 元以下時，增加碳效益尚不足以使林主延長輪伐期；而當碳價格大於 3,000 元之後，每增加 1,000 元就可使輪伐期有明顯的延長趨勢。而隨著碳釋放比率越低，最適輪伐期會縮短，因為木材砍伐之後的木製品仍能貯存部分碳量，表示砍伐後仍有部分的碳效益存在，其效果等同於木材價格上漲，因此林主會傾向於縮短最適輪伐期。

若再加上輻射能量收支等值碳量的影響，則最適輪伐期會縮短，以碳價格為 5,000 元且碳釋放比率 $\theta=1$ 的狀態來看，「木材和碳效益」的最適輪伐期為 46 年，而「木材、碳效益及輻射能量收支等值碳量」的最適輪伐期為 34 年，因森林的低反照率特性引起的正輻射驅動力大於森林較農耕地多吸收的

輻射量，以等值碳量做比較，則等值碳釋放大於等值碳吸存量，因此會抵減原始之固碳量，從而降低最適輪伐期年齡。同樣地，隨著碳釋放比率越低，林主會提早砍伐林木來獲取最大收益。

表 5 碳價格與碳釋放比率對最適輪伐期的影響

單位：年

不同木材效益組合	碳價格（元/公噸）				
	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000
僅有木材收益 (Faustmann Rotation)	20	20	20	20	20
木材+碳效益					
碳釋放比率 (θ)					
$\theta=1$	21	24	29	46	>100
$\theta=0.7$	21	21	22	24	26
$\theta=0.3$	20	21	21	21	21
木材+碳效益+輻射能量收支等值碳量					
$\theta=1$	21	23	27	34	>100
$\theta=0.7$	21	21	22	23	24
$\theta=0.3$	20	20	20	21	21

資料來源：本研究。

若再加上輻射能量收支等值碳量的影響，則最適輪伐期會縮短，以碳價格為 5,000 元且碳釋放比率 $\theta=1$ 的狀態來看，「木材和碳效益」的最適輪伐期為 46 年，而「木材、碳效益及輻射能量收支等值碳量」的最適輪伐期為 34 年，因森林的低反照率特性引起的正輻射驅動力大於森林較農耕地多吸收的輻射量，以等值碳量做比較，則等值碳釋放大於等值碳吸存量，因此會抵減原始之固碳量，從而降低最適輪伐期年齡。同樣地，隨著碳釋放比率越低，林主會提早砍伐林木來獲取最大收益。

當碳價格足以使林主延長輪伐期時，「僅有木材收益」、「木材和碳效益」、「木材、碳效益及輻射能量收支等值碳量」的三種情境之最適輪伐期 (T 、 T_{cs} 、

T_{tecs}) 長度為： T_{cs} 大於等於 T_{tecs} ，且 T_{tecs} 大於等於 T 。此結果與 Thompson、Adams 與 Sessions (2009) 探討輻射驅動力與最適輪伐期所得之結論一樣，其原因主要為植物光合作用所需之能量僅占總太陽輻射量的極小部分，其吸入的輻射能量小於減少地表反照率所測得之正輻射驅動力，因此，以森林的輻射能量收支效果來看，造林存在著全球暖化的因素，造林與否，端視森林之固碳作用加上吸收的輻射量與正輻射驅動力相較下，何者的效果較強。

4.3.3 林地期望值的估計結果

隨著森林可計量的外部效益增加，林地期望值也會加倍成長。「僅有木材收益」之最適輪伐期為 20 年，其林地期望值為每公頃 439,108.53 元，此時二氧化碳吸存量為每公頃 66.32 公噸（表 7）；若碳釋放比例為 1，當碳價格為 2,000 元時，林地期望值增至每公頃 658,910.55 元，與「僅有木材收益」之林地期望值相比，其變動比例高達 50.60%，但納入輻射能量收支等值碳量的考量後，林地期望值會下降為每公頃 636,543.24 元，而林地期望值變動比例變為 44.96%，此兩種情境下的最適輪伐期皆延長一年；當碳價格為 4,000 元時，林地期望值增至每公頃 922,383.14 元，其變動比例為 110.86%，納入輻射能量收支等值碳量的考量後，林地期望值會下降為每公頃 862,234.31 元，變動比例變為 96.36%，而「木材和碳效益」與「木材、碳效益及輻射能量收支等值碳量」之最適輪伐期分別為 29 與 27 年，較「僅有木材收益」之最適輪伐期各延長 9 與 7 年。上述結果詳如表 6，呈現碳釋放比例為 1 時，各種碳價格所對應的林地期望值，並顯示出林地期望值之變動比例。

如前所述，隨著碳價格之增加，最適輪伐期會延長且林地期望值會增加，圖 2 繪製不同碳價格下杉木最適輪伐期與林地期望值的關係。值得注意的是，當碳價格越高，則林地期望值曲線的尾端則愈平坦；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值差異不大，即砍不砍伐之淨現值差異不大，最適輪伐期的時點可能無限期延長。

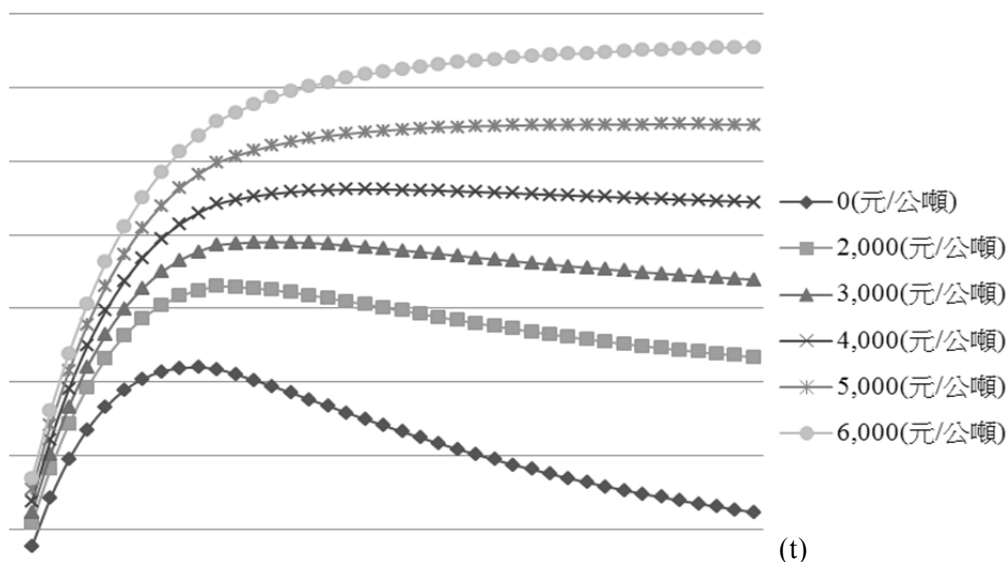
表 6 不同碳價格下之最適輪伐期、林地期望值與其變動比例

項目	碳價格 (元/公噸)				
	<500	2,000	3,000	4,000	5,000
木材+碳效益					
不同木材效益組合	20	21	24	29	46
林地期望值 (元/公頃)	439,108.53	658,910.55	780,005.30	922,383.14	1,099,159.78
林地期望值之變動比例 (%)	--	50.60	77.63	110.06	150.32
木材+碳效益+輻射能量收支等值碳量					
最適輪伐期 (年)	20	21	23	27	34
林地期望值 (元/公頃)	439,108.53	636,543.24	741,788.88	862,234.31	1,005,002.48
林地期望值之變動比例 (%)	--	44.96	68.93	96.36	128.87

資料來源：本研究。

註：林地期望值之變動比例為與未有碳價格機制下的林地期望值作比較。

林地期望值 (元)



資料來源：本研究。

圖 2 不同碳價格下杉木最適輪伐期與林地期望值的關係

4.3.4 最適輪伐期與實質二氧化碳吸存量的關係

實質二氧化碳吸存量為「林木生長期間所吸存的二氧化碳量-伐木時所釋放的二氧化碳量」並將其折現，計算方式為 $\alpha \int_0^T v'(t)e^{-rt} dt - \alpha V(T)e^{-rT}$ ，而此處碳釋放比例皆假設為 1。表 7 顯示出每增加一年輪伐期，可累積的實質二氧化碳吸存量及其變動比例：

表 7 最適輪伐期與實質二氧化碳吸存量的變化

最適輪伐期（年）	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
CO ₂ 吸存量 （公噸/公頃）	66.3	72.7	79.0	85.2	91.2	97.2	102.9	108.6	114.0	119.3
CO ₂ 吸存量之變動比例（%）	--	9.62	8.67	7.84	7.11	6.50	5.94	5.44	5.01	4.62

資料來源：本研究。

註：二氧化碳吸存量之變動比例為最適輪伐期多延長一年之二氧化碳吸存量的變化。

由表 7 得知，最適輪伐期每增加一年，實質二氧化吸存量也會跟著增加，然而二氧化碳吸存量比例卻逐漸減少，表示多上升一單位的二氧化碳吸存量其邊際成本逐漸遞增。

V、結論與建議

氣候暖化已成為長期的環境壓力，所有物理環境因而改變，對地球上的生命產生迅速與重大的擾動。自有人類以來，人類為了生存以及追求更好的生存環境，不斷向大自然索取資源與空間，工業革命後，過多的人造溫室氣體排放，破壞了大自然的規律，因此全球正積極制訂法規希望減緩氣候變遷的速率。在各國環境保護的政策措施與策略中，森林扮演著相當重要的角色，

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。然而近年來有不少學者提出造林存在暖化因子，因林木的反射率較低且顏色比農耕地深，可能吸收更多熱能，尤其在高緯度地區，更可能引發暖化效應，但森林所吸收的能量有一部份會轉存為化學能，供生態系統使用，並不完全以熱能型式散失。因此，本研究模擬在森林碳效益與輻射能量收支下，最適輪伐期、林地期望值與實質二氧化碳吸存量之影響。

根據本研究之實證結果，若無碳價格機制，最適輪伐期為 20 年，林地期望值為每公頃 439,108.53 元，二氧化碳吸存量為每公頃 66.32 公噸，若存在碳價格機制，在「木材+碳效益」的情況下，最適輪伐期會增加，且隨著碳價格的增加，最適輪伐期會延長，林地期望值也會上升，若再加上輻射能量收支等值碳量的影響，則最適輪伐期會稍微縮短，抵減森林部份的固碳作用，針對「僅有木材收益」、「木材和碳效益」、「木材、碳效益及輻射能量收支等值碳量」三種情境下之最適輪伐期（ T 、 T_{cs} 、 T_{tecs} ）做比較，其長度為： T_{cs} 大於等於 T_{tecs} ，且 T_{tecs} 大於等於 T 。

然而碳價格的高低影響輪伐期延長程度：當碳價格低於 500 元以下時，尚不足以使林主延長輪伐期；而當碳價格大於 3,000 元之後，每增加 1,000 元就可使輪伐期有明顯增長。另一方面，隨著碳釋放比率越低，最適輪伐期會縮短，因木製品仍能貯存部分碳量，表示伐木後仍有部分的碳效益，其效果等同於木材價格上漲，林主會傾向縮短輪伐期。若希望杉木的最適輪伐期有顯著延長，且政府選擇採取碳補貼/稅的誘因機制，如何在碳價格與二氧化碳期望吸存量之間取得平衡，相關單位應謹慎評量。

雖然台灣已意識到林木吸存碳的價值，且政府獎勵造林且提倡保林，但由於我國並非為京都議定書的締約國，目前並沒有碳交易價格機制存在，由本文的實證研究結果可知，此對於林木輪伐期的延長沒有助益。所以，為因應國際溫室氣體減量，使我未來林業政策的方向能與國際接軌，政府未來可朝向建立相關二氧化碳交易的價格機制。

杉木多生長在亞熱帶氣候區，冬季降雪時刻短而生長季較長，因此造林所產生之地表反照率差異較寒帶地區小，且生長較快，故正輻射驅動力的影響相對較小，此為本研究與 Thompson、Adams 與 Sessions（2009）結論稍為不同之處。

本研究雖已考慮碳效益與輻射能量收支做為森林之外部性影響，然而森林對氣候的影響不只有這兩個因素，舉例來說，森林能調解水氣影響降雨模式，當森林被牧場或農作物所取代，土壤和植被中蘊藏的水分和蒸散作用將大幅減少，從而降低大氣濕度和抑制降水，此影響於熱帶地區尤其明顯。另外，大面積的植被具有涵養地下水的功能，若植被被嚴重破壞將會造成沙塵暴，加速土地沙漠化，威脅人類的生存空間。因此未來若能加入森林的其他外部效益，便可更進一步探究森林對氣候的好處。

附註

1. 總初級生產力是量測某期間所有光合作用能量的總和，扣除呼吸作用後仍留存於植物組織內的能量，稱為淨初級生產力。因此淨初級生產力代表有機物質實際成為植物組織的成分，即可供植物生長的生產速率。

參考文獻

- 李國忠、林俊成、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 卷，1 期，115-123。
- 林俊成、李國忠、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 卷，1 期，51-60。
- 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、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。
- 柳婉郁、盧又銘、林國慶，2009。「同時考慮碳價格與木材價格不確定下最適輪伐期之決定」，『農業經濟叢刊』。15 卷，1 期，115-145。
- 洪富文、孫正春、黃松根，1985。「蓮華池地區不同林齡杉木林地上部生物量之分佈」，『林業試驗所研究報告』。第 444 號，1-12。
- 陳利軍、劉高煥、勵惠國，2002。「中國植被淨第一性生產力遙感動態監測」，『遙感學報』。6 卷，2 期，129-136。
- 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、黃進陸，1992。「Weibull 機率密度函數於蓮華池杉木人工林原木經濟價值之研究」，『林業試驗所研究報告季刊』。7 卷，3 期，221-230。
- 馬子斌、陳政靜、熊如珍、黃清吟、陳欣欣、翟思湧，1992。「重要商用木材之一般性質」，『台灣省林業試驗所林業叢刊』。1 卷，1 期，4-5。
- 秦建華、姜志林，1996。「杉木林生物量及其分配的變化規律」，『生態學雜誌』。15 卷，1 期，1-7。
- 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，2010。「國有林林木經營區因應減碳政策之最適經營規劃」，行政院農委會林務局補助研究計畫。tfbm-980215。台灣大學森林暨資源學系。
- 鮑平勇、張友靜、貢璐、竺建平，2007。「由遙感數據獲取的地表反照率歸一化問題探討」，『河海大學學報：自然科學版』。35 卷，1 期，67-71。
- 羅天祥、趙士洞，1997。「中國杉木林生物生產力格局及其數學模型」，『植物生態學報』。21 卷，5 期，403-415。
- Bala, G., K. Caldeira, M. Wickett, T.J. Phillips, D. B. Lobell, C. Delire, and A. Mirin, 2007. "Combined Climate and Carbon-Cycle Effects of Large-Scale Deforestation," *The National Academy of Science of the U.S.A.* 104(16): 6550-6555.
- Betts, R. A., 2000. "Offset of the Potential Carbon Sink from Boreal Forestation by Decreases in Surface Albedo," *Nature*. 408: 187-190.
- Chang, S. J., 1982. "An Economic Analysis of Forest Taxation's Impact on Optimal Rotation Age," *Land Economics*. 58(3): 310-323.
- Chang, S. J., 1983. "Rotation Age, Management Intensity, and the Economic Factors of Timber Production: Do Changes in Stumpage Price, Interest Rate, Regeneration Cost, and Forest Taxation Matter?" *Forest Science*. 29(2): 267-278.
- Curry, J.A., J.L. Schramm, and E.E. Ebert, 1995. "Sea-Ice Albedo Climate Feedback Mechanism," *Journal of Climate*. 8(2): 240-247.
- 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.
- Englin, J. and J. Callaway, 1993. "Global Climate Change and Optimal Forest Management," *Natural Resource Model*. 7: 191-202.
- 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.
- Hartman, R., 1976. "The Harvesting Decision when a Standing Forest Has Value," *Economic Inquiry*, 14(1): 52-58.
- Hoen, H. F. and B. Solberg, 1997. "Carbon Dioxide Taxing, Timber Rotations, and Market Implications," In *Economics of Carbon Sequestration in Forestry*. Edited by R. A. Sedio, R. M. Sampson, and J. Wisniewski. Boca Raton, FL: CRC Press.

- Kimmins, J. P., 1987. *Forest Ecology*. New York: Macmillan Publishing.
- Klemperer, W. D., 1977. "Forest Income Valuation Revisited," *Real Estate Appraiser*. 43(1): 18-24.
- Koskela, E., 1989. "Forest Taxation and Timber Supply under Price Uncertainty: Credit Rationing in Capital Markets," *Forest Science*. 35(1): 160-172.
- Koskela, E. and M. Ollikainen, 2001. "Forest Taxation and Rotation Age under Private Amenity Valuation: New Results," *Journal of Environmental Economics and Management*. 42(3): 374-384.
- Maclaren, J. P., 1996. "Plantation Forestry-Its Role as a Carbon Sink: Conclusions from Calculations Based on New Zealand's Planted Forest Estate," In *Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*. Edited by M. J. Apps and D. T. Price, Berlin: Springer-Verlag.
- Myhre, G., E. J. Highwood, K. Shine, and F. Stordal, 1998. "New Estimates of Radiative Forcing Due to Well Mixed Greenhouse Gases," *Geophysical Resource Letter*. 25 (14): 2715-2718.
- Pietro, W. J., 2009. "Ethanol as an Alternative Fuel for Automobiles," *Journal of Chemical Education*. 86(5): 579-581.
- Plantinga, A.J. and R.A. Birdsey, 1994. "Optimal Forest Stand Management when Benefits are Derived from Carbon," *Natural Resource Modeling*. 8(4): 373-387.
- Sedjo, R.A., 1989. "Forest to Offset the Greenhouse Effect," *Journal of Forestry*. 87(7): 12-15.
- Sedio, R. A. and A. Solomon, 1989. "Climate and Forests," In *Greenhouse Warming: Abatement and Adaptation*, pp. 105-109. Edited by N. Rosenberg, W. E. Easterling, III, P. Crosson, and J. Darmstadter. Washington, D.C.: Resources for the Future.
- Stainback, G. A., and R. R. Alavalapati, 2002. "Economic Analysis of Slash Pine Forest Carbon Sequestration in the Southern U.S.," *Journal of Forest Economics*. 8(2): 105-117.
- Thompson, M. P., D. Adamsand, and J. Sessions, 2009. "Radiative Forcing and the Optimal Rotation Age," *Ecological Economics*. 65(10): 2713-2720.

Thomson Reuters, 2015. Carbon Market Daily: Point Carbon. 取自 <http://crf.thomsonreuters.com/news/cmd/>.

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(2): 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*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

附錄 I

理論模型推導：

$$\begin{aligned} & \text{Max}_T LEV_{tcs} \\ &= \frac{[pv(T) - c]e^{-rT} + p_c \alpha \int_0^T v'(t)e^{-rt} dt \pm p_c \int_0^T A'(t)e^{-rt} dt - p_c [\alpha \theta v(T) \pm A(T)]e^{-rT}}{1 - e^{-rT}} \end{aligned} \quad (I.1)$$

$$\begin{aligned} &= \left\{ [pv(T) - c]e^{-rT} + p_c \alpha \left[v(T)e^{-rT} + r \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \right] \right. \\ &\quad \left. \pm p_c \left[A(T)e^{-rT} + r \int_0^T A(t)e^{-rt} dt \right] - p_c [\alpha \theta v(T) \pm A(T)]e^{-rT} \right\} \\ &\quad \times \frac{1}{1 - e^{-rT}} \\ &= \left\{ [pv(T) - c]e^{-rT} + p_c \alpha (1 - \theta) v(T)e^{-rT} \right. \\ &\quad \left. + p_c \alpha r \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \pm p_c r \int_0^T A(t)e^{-rt} dt \right\} \times \frac{1}{1 - e^{-rT}} \\ &= \frac{[p + p_c \alpha (1 - \theta)]v(T)e^{-rT} - ce^{-rT} + rp_c \alpha \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \pm rp_c \int_0^T A(t)e^{-rt} dt}{1 - e^{-rT}} \end{aligned} \quad (I.2)$$

對 T 做 F.O.C

$$\begin{aligned} & \frac{p + p_c \alpha (1 - \theta)}{(1 - e^{-rT})^2} \{ [v'(T)e^{-rT} + v(T)(-r)e^{-rT}](1 - e^{-rT}) - v(T)e^{-rT} \cdot re^{-rT} \} \\ & - \frac{c}{(1 - e^{-rT})^2} [-re^{-rT}(1 - e^{-rT}) - e^{-rT} \cdot re^{-rT}] \\ & + \frac{rp_c \alpha}{(1 - e^{-rT})^2} \left[v(T)e^{-rT}(1 - e^{-rT}) - \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \cdot re^{-rT} \right] \\ & \pm \frac{rp_c}{(1 - e^{-rT})^2} \left[A(T)e^{-rT}(1 - e^{-rT}) - \int_0^T A(t)e^{-rt} dt \cdot re^{-rT} \right] = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \rightarrow \frac{p + p_c \alpha (1 - \theta)}{(1 - e^{-rT})^2} [v'(T)e^{-rT}(1 - e^{-rT}) - rv(T)e^{-rT}] + \frac{rce^{-rT}}{(1 - e^{-rT})^2} \\
& \quad + \frac{rp_c \alpha}{(1 - e^{-rT})^2} \left[v(T)e^{-rT}(1 - e^{-rT}) - r \int_0^T v(t)e^{-rt} dt e^{-rT} \right] \\
& \quad \pm \frac{rp_c}{(1 - e^{-rT})^2} \left[A(T)e^{-rT}(1 - e^{-rT}) - r \int_0^T A(t)e^{-rt} dt e^{-rT} \right] = 0 \\
\\
& \rightarrow \frac{p + p_c \alpha (1 - \theta)}{(1 - e^{-rT})} v'(T)e^{-rT} + \frac{rp_c \alpha}{(1 - e^{-rT})} v(T)e^{-rT} \pm \frac{rp_c}{(1 - e^{-rT})} A(T)e^{-rT} \\
& \quad = \frac{r[p + p_c \alpha (1 - \theta)]}{(1 - e^{-rT})^2} v(T)e^{-rT} + \frac{r^2 p_c \alpha e^{-rT}}{(1 - e^{-rT})^2} \\
& \quad \quad \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \pm \frac{r^2 p_c e^{-rT}}{(1 - e^{-rT})^2} \int_0^T A(t)e^{-rt} dt - \frac{rce^{-rT}}{(1 - e^{-rT})^2} \\
& \rightarrow [p + p_c \alpha (1 - \theta)]v'(T) + rp_c [\alpha v(T) \pm A(T)] \\
& = \frac{r}{(1 - e^{-rT})} \left\{ [p + p_c \alpha (1 - \theta)]v(T) - c + rp_c \alpha \int_0^T v(t)e^{-rt} dt \pm rp_c \int_0^T A(t)e^{-rt} dt \right\} \\
& \hspace{25em} (1.3)
\end{aligned}$$

Forest Optimal Rotation and Land Expectation Values under Carbon Sequestration and Radiation Budget

Shan-non Chin* and Hui-Chun Wei**

International efforts strive to mitigate the rate of climate change caused by man-made greenhouse gas emissions. Attributing an economical value to forest carbon sequestration might represent an important strategy to achieve such goals. Such a policy is likely to impact optimal rotation periods in forestry management. However, accounting for carbon sequestration alone is not sufficient; the lower surface albedo of forests, compared to converted land, causes a higher grade of heat absorption, which negatively affects the policy value of forests. Yet due to photosynthesis, not all of the absorbed energy is converted to heat, but partially used as chemical energy.

*Thus, this paper discusses the optimum rotation periods and land expectation values of *Cunninghamia lanceolata* under the impact of carbon sequestration and the mentioned radiation budget. The findings suggest that in the presence carbon sequestration pricing, the optimal rotation periods and land expectation values ought to increase proportionally to carbon prices. The optimal rotation periods of three different scenarios is compared: "just a timber (T)," "timber and carbon benefits (T_{cs})," and "timber · carbon and carbon equivalent of radiation budget (T_{tecs})". The relation between them is: T_{cs} is greater than or equal to T_{tecs} ; T_{tecs} is greater than or equal to T.*

Keywords: *optimal rotation, land expectation values, carbon sequestration, surface albedo, carbon benefits, radiation budget*

* Associate Professor, Institute of Economics, National Sun Yat-sen University. Tel: +886-7-5255752, E-mail: Shannon@mail.nsysu.edu.tw. (Corresponding Author)

** Master, Institute of Economics, National Sun Yat-sen University.

The author is indebted to the three anonymous referees for their helpful comments. All errors in this paper are the sole responsibility of the authors.