

同時考慮碳價格與木材價格不確定下 最適輪伐期之決定

柳婉郁^{*}、盧又銘^{**}、林國慶^{***}

世界各國開始重視以森林碳吸存作為二氧化碳排放減量之政策工具，將部份農地轉為造林地來增加碳吸存之方式，成為世界各國控制溫室氣體排放之趨勢。以政府而言，社會期待造林地主延長輪伐期，以增加森林之碳吸存量。大部分的文獻僅考慮價格確定下之模型，然現實市場存在諸多不確定性因素，因此本研究同時考慮木材價格與碳價格兩變數不確定下之最適輪伐期，並以我國地主種植杉木為例進行實證模擬分析，分析台灣私有地主面對木材價格與二氧化碳價格隨機波動下之最適輪伐期，本研究亦考慮林木砍伐之後碳釋放比率不同對輪伐期之影響。本研究之主要研究結果如下：(1) 杉木價格與二氧化碳價格固定時，則我國地主在存在有碳價格時之輪伐期比不存在碳價格時之輪伐期短，主要是因為二氧化碳價格過低所致。(2) 杉木價格與二氧化碳價格固定時，則我國杉木之最適輪伐期為 21 年，而考慮任一變數隨機變動時，其輪伐期均會比價格固定下之輪伐期長，其中以杉木價格變動造成輪伐期增加之影響較為顯著。(3) 當考慮折現率變動下，則無論杉木價格與二氧化碳價格變動與否，折現率越高，則輪伐期均會愈短。(4) 當杉木價格隨機變動而二氧化碳價格固定時，則當折現率為 3% 以上時，碳釋放比例愈小，則輪伐期愈短。其次，當杉木價格與二氧化碳價格均隨機變動時，則隨著碳釋放比例愈小，輪伐期亦愈短。

關鍵詞：最適輪伐期、碳價格、碳吸存、不確定性

* 真理大學自然資源應用學系助理教授。

** 國立台灣大學農業經濟系碩士。

*** 國立台灣大學農業經濟學系教授。本文之通訊作者。

I、緒論

近年來世界各國開始重視以森林碳吸存作為二氧化碳排放減量之政策工具，將部份農地轉為造林地來增加碳吸存之方式，亦成為世界各國控制溫室氣體排放之趨勢。以政府而言，社會期待私有地主延長輪伐期，以增加森林之碳吸存量。但當土地為私人所有時，政府或社會必須針對森林所吸存的碳提供經濟誘因，以促使私有地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，使得森林碳吸存轉為貨幣價值，增加私有地主造林誘因，促使私有地主提升森林的碳吸存能量。其誘因機制有許多種，包括碳獎勵金、碳補貼、碳交易機制等（Van Kooten *et al.*, 1995；Romero *et al.*, 1998；Appels, 2001；Murray, 2000、2003；Lewandrowski *et al.*, 2000；Chladná, 2007；林國慶, 2006、2007、2008；柳婉郁, 2004、2008）。在 2005 年 2 月生效的京都議定書內容中允許之京都機制包括排放權交易（Emission Trading, 以下簡稱 ET）、清潔發展機制（Clean Development Mechanism, 以下簡稱 CDM）及聯合減量（Joint Implementation, 以下簡稱 JI）三種，其中就碳交易制度而言，碳價格由市場供需決定，因此與木材價格相同，存在有波動現象。

我國尚未有森林碳交易制度（註 1），但國際間已有許多森林碳交易經驗（Cacho *et al.*, 2003），例如巴拉圭、哥斯大黎加、百里斯、玻利維亞、馬來西亞、美國、巴西、俄羅斯聯邦、澳大利亞及墨西哥等（李國忠、林俊成, 2000a、2000b；林俊成、王培蓉, 2006）。當碳價格存在時，則碳價格之波動將影響森林碳吸存之供給方—造林地主之砍伐決策。一般而言，在無其他誘因機制下，私有地主在追求利潤極大下決定之輪伐期（註 2）將會比加入考量碳吸存量因素後之輪伐期來得短。因此理論而言，當碳價格存在後，將會促使地主延長輪伐期。而碳價格的波動（註 3），將會影響地主的

砍伐決策，亦即影響最後的砍伐時點。因此以不確定性模型來分析地主之砍伐決策，更具一般化。

在輪伐期決定之相關議題上，過去文獻有相當多的探討，最早在 1849 年由 Faustmann 提出極大化土地期望價值 (Land Expected Value, 以下簡稱 LEV) 來決定最適輪伐期，開啓後續輪伐期決定之相關研究 (註 4)。在過去探討地主之砍伐決策 (註 5) 之文獻中，大部分是考慮確定模型，如 Van Kooten *et al.* (1995) 以林木確定模型 (Deterministic Model) 分析在不同的碳吸存收入與不同碳釋放程度下之社會最適輪伐期 (Socially Optimal Rotation Length)；Romero *et al.* (1998) 以社會規劃者角度，採用確定模型 (Deterministic Model) 分析社會福利函數，以及林木砍伐收入與林木碳吸存收入間之抉擇，並估算使林主達到最適輪伐期之最適碳補貼金額；而 Sohngen 與 Mendelsohn (2003) 則是以確定的一般均衡模型 (Deterministic General Equilibrium Model) 推導碳價格與木材價格之內生時間路徑，進而分析最適輪伐期。以上文獻均使用價格確定模型，也未考慮不同碳價格下對於砍伐決策之影響。由於 Faustmann 將木材價格假設為常數，但市場上的林木價格一般存在波動 (註 6)，因此 1980 年後，價格不確定性因素成為輪伐期研究焦點，如 Brock *et al.* (1982)、Brazee 與 Mendelsohn (1988)、Morck *et al.* (1989)、Englin 與 Klan (1990)、Haight 與 Holmes (1991)、Thomson (1992) 等均考慮價格不確定或市場隨機性因素來決定最適輪伐期。大部分的研究指出，考慮價格不確定性因素後 (例如設定其為對數常態的發散過程等)，所求出的最適輪伐期比過去固定價格下之最適輪伐期來得長。然而以上這些文獻大部分僅考慮單一價格變數不確定的情形，討論兩變數以上變動之文章相當少 (註 7)，在最適輪伐期決定之議題上，目前僅有 Chladná (2007) 同時考慮木材價格與碳價格不確定下來決定最適輪伐期。然而 Chladná (2007) 僅考慮單一輪伐期之決策情形，較不符合現實中無窮個輪伐期之情況。

台灣目前並沒有碳價格存在，世界上多數國家亦無碳價格之存在，但為因應國際溫室氣體減量，未來可能存在相關碳價格機制 (註 8)，因此地主

在進行任何決策時，將面臨木材價格波動（註 9）與碳價格波動之環境。因此，本研究引用 Chladná（2007）同時考慮木材價格與碳價格兩變數波動的理論模型（註 10），除考慮碳價格與木材價格波動之情形外，亦進一步考慮地主在無窮個輪伐期下進行決策（註 11），以供未來分析與台灣環境類似國家時之參考。本研究以台灣私有地主種植杉木為例，探討木材價格與碳價格不確定下台灣私有林主之最適輪伐期，並對於木材價格確定與不確定以及碳價格確定與不確定等交叉組合共四種情形下之最適輪伐期進行比較分析，以作為未來政府制訂相關碳管理機制之政策參考。本文分成四節，第一節為緒論，第二節為理論模型，第三節為實證模擬與結果分析，第四節為結論。

II、理論模型

一般而言，最適輪伐期主要在木材價格固定之設定下進行求解，然而在更長的營林週期，私有地主所面對的不可預期狀況更多，因此在一般化模型中必須考慮到各種不確定性因素。在造林期間，林主面對的不確定因素非常多，通常模型無法將所有波動因素考慮進來（註 12）（Guthrie & Kumareswaran，2007），最常被考慮的因素為不可預測程度最高的市場價格。本研究考慮碳價格存在之市場分析，因此，考慮之波動變數包括木材價格與碳價格兩者，以 Chladná（2007）考慮之不確定模型為基礎，進行最適輪伐期之模型建構。

2.1 模型設定

考慮二氧化碳價格與木材價格波動因素下，決策價值決定於時間(t)、木材價格(P_t)、材積($S(t)$)、及二氧化碳價格(P_t^c)四個部分，以下為模型建構的過程。

2.1.1 木材價格(P_t)

假設木材價格為隨機波動且服從平均數回歸過程 (Mean Reverting Process)，則木材價格可以(1)式表示：

$$\frac{dP_t}{dt} = \alpha P_t (\ln \bar{P} - \ln P_t) + \sigma P_t \frac{dW_t}{dt} \quad (1)$$

如上式，其中 P_t 為 t 時木材價格 (元/立方公尺)， \bar{P} 為木材平均價格 (元/立方公尺)， t 為時間 (年)， α 為平均數回歸速率， σ 為木材價格變動之標準差， W_t 為韋納過程 (Wiener Process) (註 13)。此外，(1)式所表示的平均數回歸過程服從馬可夫性質 (Markov Property)，即木材價格未來的波動僅決定於現值，與過去的狀況無關。式(1)經整理且令 $\mu = \ln \bar{P}$ 可寫為(2)式：

$$dP_t = \alpha(\mu - \ln P_t)P_t dt + \sigma P_t dW_t \quad (2)$$

2.1.2 二氧化碳價格(P_t^c)

假設二氧化碳價格為隨機波動且服從幾何布朗運動 (Geometric Brownian Motion，以下簡稱 GBM)，則二氧化碳價格之波動型態可以(3)式表示：

$$P_t^c = e^{\mu^c t + \sigma^c W_t^c} \quad (3)$$

其中 t 為時間 (年)， P_t^c 為 t 時二氧化碳價格 (元/噸)， μ^c 為二氧化碳價格變動之平均數， σ^c 為二氧化碳價格變動之標準差， W_t^c 為韋納過程 (Wiener Process)。 (3)式等號兩邊同取 \ln 得下式：

$$\ln P_t^c = \mu^c t + \sigma^c W_t^c \quad (4)$$

對(4)式微分得：

$$\frac{dP_t^c}{dt} \frac{1}{P_t^c} = \mu^c + \sigma^c \frac{dW_t^c}{dt} \quad (5)$$

將(5)式等號兩邊同乘以 $P_t^c dt$ ，經整理後可得(6)式（註 14）：

$$dP_t^c = \mu^c P_t^c dt + \sigma^c P_t^c dW_t^c \quad (6)$$

2.1.3 材積($S(t)$)

林木的材積隨時間而改變，為時間(t)的函數，以 $S(t)$ 表示。林木每年的生長量為該年度所增加的材積，即材積在某段時間內的變動，因此林木生長函數以(7)式來表示：

$$g(S_t) = \frac{dS_t}{dt} \quad (7)$$

其中 $g(S_t)$ 為林木生長函數， S_t 為 t 時的材積（立方公尺/公頃）， t 為時間（年）。

2.1.4 決策現值函數($V(t, S_t, P_t, P_t^c)$)

假設地主之決策時點以離散方式表示，且每個決策時點只進行一次決策， $\{a(t)\}_{t=1}^T$ 為 t 時執行的決策函式，存在二氧化碳價格後， $A(t, S_t, P_t, P_t^c)$ 為 t 時可選擇的所有決策，私有地主之決策目標為追求淨現值極大，私有地主在第 t 時執行決策 $a(t)$ 時，決策現值函數可寫為(8)式：

$$V(t, S_t, P_t, P_t^c) = \max_{a(t) \in A(t, S_t, P_t, P_t^c)} \left\{ \pi_{a(t)}^c(S_t, P_t, P_t^c) + e^{-\beta \Delta t} E(V(t + \Delta t, S_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}^c)) \right\} \quad (8)$$

如上式， t 為時間（年）， S_t 為 t 時的材積（立方公尺/公頃）， P_t 為 t 時木材價格（元/立方公尺）， P_t^c 為 t 時二氧化碳價格（元/噸）， $a(t)$ 為 t 時執行的決策， $A(t, S_t, P_t, P_t^c)$ 為 t 時可選擇的所有決策， $\pi_{a(t)}^c$ 為執行 $a(t)$ 決策可獲得的利潤， β 為折現率， Δt 為時間的變動（年）， $e^{-\beta \Delta t}$ 為經過 Δt 時以連續複利方式折現至執行決策時點的折現參數。

第(8)式為貝爾曼方程式（Bellmann Equation）或稱最適基本方程式（Fundamental Equation of Optimality），即私有地主在考慮二氧化碳價格與木材價格極大下執行其決策。 $\pi_{a(t)}^c(S_t, P_t, P_t^c)$ 表示私有地主在 t 時執行 $a(t)$ 決策時可得到的利潤， $E(V(t + \Delta t, S_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}^c) | S_t, P_t, P_t^c)$ 表示在 t 時對於下一期（ $t + \Delta t$ ）的預期利潤，即「對於未來投資機會的選擇」，也就是「潛在投資機會所產生的選擇價值」。此外，私有地主在 t 時考慮是否執行決策時，只對下一期有預期的價值，因此私有地主在每一期均追求利潤極大之決策。

本研究考慮私有地主有以下兩種決策：

$a(t) = 1$ ：維持立木狀態；

$a(t) = 2$ ：收穫砍伐林木。

因此，地主擁有放棄投資造林之選擇權（Option to Abandon），即私有地主可繼續維持立木狀態，或者選擇砍伐收穫所有木材，而私有地主可執行的所有決策可表示為 $A(t, S_t, P_t, P_t^c) = \{1, 2\}$ 。設 $f_{a(t)}(S_t)$ 為執行完決策 $a(t)$ 所砍伐的木材量，為材積（ S_t ）的函數。根據前述設定，私有地主之決策為可繼續維持立木狀態，決策函式以 $a(t) = 1$ 來表示， $f_1(S_t) = 0$ ，表示私有地主不砍伐木材；而若私有地主之決策為砍伐並出售木材，則決策函式以 $a(t) = 2$ 來表示， $f_2(S_t) = S_t$ ，表示所有木材皆砍伐。

考慮碳價格下，私有地主因森林的碳吸存而獲得碳收入，此部分表示為 $\gamma \Delta S_t P_t^c$ ，其中 γ 為材積與二氧化碳的轉換係數， ΔS_t 為材積的變動； P_t^c 為 t 時二氧化碳價格。根據 Chladná（2007），本研究將 γ 設定為 $\gamma \approx 0.25 \times 44 / 12 \approx 0.92$ ；此外，砍伐木材會造成碳的釋放，設 $f_{a(t)}^c(S_t)$ 表示砍

伐的木材量，為材積(S_t)的函數。進一步令 θ 為碳釋放的比例，因此當私有地主選擇維持立木狀態不砍伐木材($a(t)=1$)，因碳釋放所須支付的碳支出為0；當私有地主選擇砍伐林木進而出售木材($a(t)=2$)，此時碳釋放所須支付的碳支出為 $\theta\gamma S_t P_t^c$ 。

私有地主在每一時點均追求利潤極大下來進行決策，在 t 時考慮是否執行砍伐決策時，只對下一期有「預期」的價值，以下將(8)式分為利潤函數及選擇權價值兩部分來討論。

2.1.5 利潤函數 ($\pi_{a(t)}^c(S_t, P_t, P_t^c)$) 與選擇權價值

私有地主在第 t 時執行砍伐決策時可獲得的利潤($\pi_{a(t)}$)來自出售木材加上碳收入再扣除砍伐木材造成碳釋放所需償還的部份，以(9)式表示：

$$\pi_{a(t)}^c(S_t, P_t, P_t^c) = f_{a(t)}(S_t)(P_t - C_{a(t)}) + \gamma \Delta S_t P_t^c - f_{a(t)}^c(S_t) P_t^c \quad (9)$$

如上式， $\pi_{a(t)}^c$ 為執行決策 $a(t)$ 可獲得的利潤， S_t 為 t 時的材積(立方公尺/公頃)， P_t 為 t 時木材價格(元/立方公尺)， P_t^c 為 t 時二氧化碳價格(元/噸)， $f_{a(t)}(S_t)$ 為執行完決策 $a(t)$ 所砍伐的木材量， $C_{a(t)}$ 為執行決策 $a(t)$ 每立方公尺所需的成本(元/立方公尺)， γ 為材積與二氧化碳的轉換係數(註15)， ΔS_t 為材積的變動(立方公尺/公頃)， $f_{a(t)}^c(S_t)$ 為造成碳釋放所砍伐的木材量(立方公尺/公頃)。第(9)式表示執行決策 $a(t)$ ，私有地主可得到的利潤包括出售木材($f_{a(t)}(S_t)(P_t - C_{a(t)})$)、碳價格收入($\gamma \Delta S_t P_t^c$)及砍伐木材導致碳釋放所須支付的碳支出($f_{a(t)}^c(S_t) P_t^c$)。

其中 $a(t)$ 為決策函數，當 $a(t)=1$ 時表示私有地主選擇維持立木狀態不砍伐林木，故此時因碳釋放所需買回的碳支出為0； $a(t)=2$ 時表示私有地主選擇砍伐林木，故此時砍伐造成的碳釋放需支付的碳支出為 $f_2^c(S_t) = \theta\gamma S_t$ 。

根據(9)式的利潤函數及砍伐木材量 ($f_{a(t)}^c(S_t)$) 與材積(S_t)的關係可知，私有地主選擇砍伐之決策，即 $a(t) = 2$ 時，利潤函數可改寫為(10)式：

$$\begin{aligned} \pi_2^c(S_t, P_t, P_t^c) &= f_2(S_t)(P_t - C_2) + \gamma \Delta S_t P_t^c - f_2^c(S_t) P_t^c \\ &= S_t(P_t - C_2) + \gamma \Delta S_t P_t^c - \theta \gamma S_t P_t^c \end{aligned} \quad (10)$$

其中 π_2^c 為執行決策 $a(t) = 2$ 可獲得的利潤， $f_2(S_t)$ 為執行完決策 $a(t) = 2$ 所砍伐的木材量， C_2 為執行決策 $a(t) = 2$ 每立方公尺所需的成本（元/立方公尺）， $f_2^c(S_t)$ 為造成二氧化碳釋放所砍伐的木材量（立方公尺/公頃）。(10)式即為私有地主選擇伐木可獲得的利潤，包括木材的收入、碳吸存所獲得的收入及碳釋放所須支出買回的部分。

從(8)式可知，選擇權價值為下式：

$$e^{-\beta \Delta t} E(V(t + \Delta t, S_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}^c) | S_t, P_t, P_t^c) \quad (11)$$

此式表示私有地主在 t 時對於 $t + \Delta t$ 時的預期利潤，即「對於未來投資機會的選擇」，也就是「潛在投資機會所產生的選擇權價值」。

2.2 私有地主執行決策時點之性質

假設私有地主之決策時點發生在 $t_0, t_1, \dots, t_n = T$ 執行，且在各項可選擇的決策行為與執行該決策後可獲得相關的收益之間沒有時間上的落遲，意即決策行動的收益在執行決策時點同時發生。因此，固定時點 $t \in (t_j, t_{j+1})$, $j = 0, \dots, n$ 若沒有執行砍伐決策，則利潤函數部分為 0，故決策價值可由(8)式改寫為：

$$V(t, S_t, P_t, P_t^c) = 0 + e^{-\beta \Delta t} E(V(t + \Delta t, S_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}^c) | S_t, P_t, P_t^c), \quad t \in (t_j, t_{j+1}) \quad (12)$$

如上式， Δt 為時間的變動（年）， $e^{-\beta \Delta t}$ 為經過 Δt 時以連續複利方式折現至執行決策時點的折現參數。第(12)式表示私有地主在 t 時對於下一期

($t + \Delta t$ 時)的預期利潤。根據 Dixit 與 Pindyck (1994) 的方法，將 $e^{-\beta\Delta t}$ 移項並重新整理如下：

$$\begin{aligned}(e^{\beta\Delta t} - 1)V(t, S_t, P_t, P_t^c) &= E(V(t + \Delta t, S_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}, P_{t+\Delta t}^c) | S_t, P_t, P_t^c) - V(t, S_t, P_t, P_t^c) \\ &= E(\Delta V | S_t, P_t, P_t^c)\end{aligned}$$

即
$$\beta V(t, S_t, P_t, P_t^c) = \beta \frac{1}{e^{\beta\Delta t} - 1} E(\Delta V(t, S_t, P_t, P_t^c) | S_t, P_t, P_t^c)$$

將 $e^{\beta\Delta t}$ 以泰勒展開式展開且令 Δt 趨近於 0 可得：

$$\beta V(t, S_t, P_t, P_t^c) = \frac{1}{dt} E(dV(t, S_t, P_t, P_t^c) | S_t, P_t, P_t^c)$$

當 $E(dW) = 0$ ，且令木材價格變動 (2) 式與二氧化碳價格變動 (6) 式兩隨機過程之韋納過程的增加量 dW 與 dW^c 的相關係數為 ρ ，應用伊藤輔助定理 (Itô's Lemma) 可得(13)式：

$$\begin{aligned}\beta V(t, S_t, P_t, P_t^c) &= \gamma g(S_t) P_t^c + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial S_t} g(S_t) + \alpha(\mu - \ln P_t) P_t \frac{\partial V}{\partial P_t} + \mu^c P_t^c \frac{\partial V}{\partial P_t^c} \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\sigma^2 P_t^2 \frac{\partial^2 V}{\partial P_t^2} + (\alpha^c P_t^c)^2 \frac{\partial^2 V}{\partial (P_t^c)^2} \right) + \rho \sigma \sigma^c P_t P_t^c \frac{\partial^2 V}{\partial P_t \partial P_t^c}, \\ &t \in (t_j, t_{j+1})\end{aligned}\tag{13}$$

(13)式為(12)式以 Dixit 與 Pindyck (1994) 的方法轉換，再加入木材價格 (P_t) 及二氧化碳價格 (P_t^c) 的假設 (依據(4)式與(6)式)、材積 (S_t) 與林木生長函數 ($g(S_t)$) 的設定 (根據(7)式) 而得的結果，意義與(12)式相同，表示在價格呈平均數回歸過程、二氧化碳價格呈幾何布朗運動之下，私有地主在 t 時對於下一期 ($t + \Delta t$ 時) 的預期利潤。

此外，決策現值函數（ $V(t, S_t, P_t, P_t^c)$ ）須符合以下條件：

$$V(t, 0, P_t, P_t^c) = 0 \quad (14)$$

$$V(t_j, S_{t_j}, P_t, P_t^c) = \pi_{a(t_j)} + \lim_{t \rightarrow t_j^+} V(t, S_t - f_{a(t_j)}(S_{t_j}), P_t, P_t^c), \quad a(t_j) \neq 2 \quad (15)$$

$$V(t_j, S_{t_j}, P_t, P_t^c) = \pi_2(S_{t_j}, P_t, P_t^c), \quad a(t_j) = 2 \quad (16)$$

(14)式表示沒有材積時，其現值為 0；(15)式表示當選擇不砍伐維持立木狀態時的現值；(16)式表示林木完全砍伐、出售木材的現值。

III、實證模擬結果分析

根據第二節之理論模型，本節以私有地主種植杉木為例，根據上述建立之價格不確定模型，就以下四種狀況進行實證模擬分析，包括（1）木材價格固定、二氧化碳價格固定；（2）木材價格固定、二氧化碳價格隨機變動；（3）木材價格隨機變動、二氧化碳價格固定；（4）木材價格隨機變動、二氧化碳價格隨機變動（註 16）。

3.1 變數設定

模型當中有三種資料須決定：（1）木材價格；（2）材積函數；（3）二氧化碳價格。此外進一步須決定收穫伐木的成本、折現率(β)及碳釋放比例(θ)。

3.1.1 木材價格

設杉木價格為一平均數回歸的隨機過程，即

$$\frac{dP_t}{P_t} = \alpha(\ln \bar{P} - \ln P_t)dt + \sigma dW_t \quad (17)$$

根據 Dixit 與 Pindyck (1994)，平均數回歸過程可對(18)式進行迴歸以估計上式的參數：

$$\ln P_t - \ln P_{t-1} = a + b \ln P_{t-1} + \varepsilon_t \quad (18)$$

其中 P_t 為 t 時杉木價格 (元/立方公尺)、 P_{t-1} 為 $t-1$ 時杉木價格 (元/立方公尺) 及 ε_t 為殘差項。

對(18)式進行迴歸可得參數 \hat{a} 、 \hat{b} ，進一步可得

$$\ln \bar{P} = -\frac{\hat{a}}{\hat{b}}$$

$$\alpha = -\ln(1 + \hat{b})$$

$$\sigma = \hat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{\ln(1 + \hat{b})}{(1 + \hat{b})^2 - 1}}$$
，其中 $\hat{\sigma}_\varepsilon$ 為迴歸式的標準差。

根據行政院農業委員會林務局之杉木價格統計資料 (1991 年 1 月至 2007 年 12 月)，再代入(18)式進行迴歸可得表 1 之估計結果 (註 17)：

表 1 平均數回歸過程 (Mean Reverting Process) 之參數估計結果

參數	係數	標準差
a	0.1992	0.1379
b	-0.0238	0.0166

資料來源：本研究。

註： $R^2 = 0.0109$ ， $\bar{R}^2 = 0.0056$ ， $\hat{\sigma}_\varepsilon = 0.0142$ ， $F = 2.065$ ， $n = 189$

由表 1 的估計結果可得(17)式之 $\ln \bar{P}$ 、 α 、 σ ：

$$\ln \bar{P} = -\frac{\hat{a}}{\hat{b}} = 8.3809 ;$$

$$\alpha = -\ln(1 + \hat{b}) = 0.0233 ;$$

$$\sigma = \hat{\sigma}_\varepsilon \sqrt{\frac{\ln(1 + \hat{b})}{(1 + \hat{b})^2 - 1}} = 0.0102。$$

3.1.2 林木生長函數

依據各種輪伐期的計算公式，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。根據陳麗琴與黃進睦（1992）所估算出的各林齡的原木成長材積，由於僅有 8~20 年每公頃之材積數據，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， $S(t) = 578.6851(1 - t^{-1.5402})^{54.3344}$ ，其杉木成長收穫函數為 t 年的函數， $S(t)$ 為林齡 t 年時的蓄積量（立方公尺/公頃）（林國慶、柳婉郁，2007a）。此外根據 $g(S_t) = dS_t / dt$ 可得杉木生長函數 $g(S_t) = 48427.7504t^{-2.5402}(1 - t^{-1.5402})^{53.3344}$ 。

3.1.3 收穫伐木的成本

本研究以杉木做為代表樹種來進行分析，種植杉木之成本包括育苗成本、出栽成本、除草成本等。造林時所需的苗木如果是由林務機關提供，出栽成本可由承包商的承包價格來估算，私有地主在第一年必須支付每公頃 30,000 元；除草成本則是私有地主在栽植後前六年支付，每年三次，每次每公頃 4,000 元，故前六年每年支付 12,000 元；至於每年管理費的估算方式，可假定雇用一長工每個月 30,000 元，負責巡視大約 800 公頃林地，因此私有地主在林木存續期間，每年每公頃均需支付管理費用 450 元。砍伐成本根據 2006 年之林業統計中，國、公、私有林砍伐費用總合換算成為每立方公尺價格，再以材積換算成為每公頃價格，取整數為 238,677 元（行政院農業委員會林務局，2007）。

3.1.4 二氧化碳價格

由於台灣尚未有二氧化碳的交易，亦不存在碳價格，因此本研究根據歐盟氣候交易所（European Climate Exchange）2007年的二氧化碳交易價格資料，再以當時的匯率換算，做為本研究實證之二氧化碳價格，如下圖。



圖 1 二氧化碳價格

資料來源：歐盟氣候交易所。

設二氧化碳價格為一幾何布朗運動，即

$$\frac{dP_t^c}{P_t^c} = \mu^c dt + \sigma^c dW_t^c \quad (19)$$

以二氧化碳價格資料計算可得 $\mu^c = 0.0012$ ， $\sigma^c = 0.0289$ 。

3.1.5 二氧化碳釋放比例

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，則所貯存的碳會釋回大氣中，其他則隨木結構製品繼續

被貯存。在森林生長的階段，私有地主可出售其林木所吸存的二氧化碳，在收穫伐木時，私有地主也須買回因伐木而釋放的二氧化碳。

定義 θ 為砍伐林木後二氧化碳的釋放比例，釋放比率因各樹種不同而不同，也因砍伐後不同的利用方式而有所不同，由於釋放比率必介於 0 至 1 之間，因此本研究考慮三種二氧化碳釋放的比例：

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

3.1.6 折現率的估計

因為林業投資時間較長，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。本研究設定之折現率（Discount Rate）以參考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%，將實質折現率設定為 3%，並以連續複利來計算。此外為模擬折現率對於最適輪伐期的影響，分別將實質折現率調整為 1% 及 5%，以進行比較分析。

3.2 實證結果與分析

根據上一節變數設定與估計，實證分析分為以下四種狀況：（1）木材價格固定、二氧化碳價格固定；（2）木材價格固定、二氧化碳價格隨機變動；（3）木材價格隨機變動、二氧化碳價格固定；（4）木材價格隨機變動、二氧化碳價格隨機變動。

比較木材價格與二氧化碳價格變動時，會受到模型變數設定之影響。本研究模型之變數包含折現率、二氧化碳釋放比例、收穫伐木之成本、林木生長函數等。本研究挑選較為敏感之因子，包括折現率與二氧化碳釋放比例等兩變數，套用上述四種情況中，各自討論折現率及碳釋放比例對於最適輪伐期的影響（註 18）。

3.2.1 木材價格固定、二氧化碳價格固定之最適輪伐期

當木材價格及二氧化碳價格固定時，即不存在價格的隨機變動，此時私有地主對於未來的收益是確定的，因此根據利潤折現值的極大值來決定最適輪伐期。在木材價格與二氧化碳價格固定的情況下，又可分成兩種情形，一為不存在二氧化碳價格（即二氧化碳價格等於零），二為存在二氧化碳價格（即二氧化碳價格大於零）。在二氧化碳價格大於零的情況下，分別對於木材價格與二氧化碳價格各增加與減少 30%，來分析木材價格與二氧化碳價格變動對於最適輪伐期的影響。

當不存在碳價格，即二氧化碳價格為零，其實證模擬結果如表 2 所示，當木材價格為 4,363.04 元/立方公尺（註 19）、實質折現率為 1%、3%、5% 時，輪伐期分別為 37 年、24 年、20 年，而當木材價格增加 30% 時（為 5,671.95 元/立方公尺），折現率為 1%、3%、5% 時，輪伐期分別為 36 年、24 年、20 年；杉木價格減少 30% 時（為 3,054.13 元/立方公尺），折現率為 1%、3%、5% 時，輪伐期分別為 38 年、25 年、21 年。因此二氧化碳價格為零，即無二氧化碳價格時，則木材價格愈高，最適輪伐期愈短；實質折現率愈高，最適輪伐期愈短。

表 2 木材價格固定、二氧化碳價格為零之輪伐期

實質折現率(β)	$P = 3,054.13$	$P = 4,363.04$	$P = 5,671.95$
1%	38	37	36
3%	25	24	24
5%	21	20	20

資料來源：本研究。

註： P 為杉木價格，單位為元/立方公尺。

當二氧化碳價格存在時，即二氧化碳價格大於零，則此時必須要考慮二氧化碳釋放比例高低。其實證結果如表 3 所示，當二氧化碳價格、碳釋放比例及實質折現率固定時，則杉木價格愈高，最適輪伐期愈長；當杉木價格、

碳釋放比例及實質折現率固定時，二氧化碳價格愈高，最適輪伐期愈短。當杉木價格、二氧化碳價格及碳釋放比例固定時，實質折現率愈高，最適輪伐期愈短，此狀況與不存在二氧化碳價格之結果相同；當杉木價格、二氧化碳價格及實質折現率固定時，碳釋放比例愈高，最適輪伐期愈短。

表 3 木材價格固定、二氧化碳價格固定之最適輪伐期

碳釋放 比例(θ)	折現率 (β)	$P_c = 575.04$			$P_c = 821.49$			$P_c = 1,067.94$		
		$P=3,054.13$	$P=4,363.04$	$P=5,671.95$	$P=3,054.13$	$P=4,363.04$	$P=5,671.95$	$P=3,054.13$	$P=4,363.04$	$P=5,671.95$
1	1%	33	34	34	31	33	33	29	31	32
1	3%	21	22	22	19	21	21	18	19	20
1	5%	17	17	18	15	16	17	14	15	16
0.7	1%	34	35	35	33	34	34	32	33	33
0.7	3%	22	22	22	21	22	22	20	21	21
0.7	5%	18	18	18	17	17	18	16	17	17
0.3	1%	36	36	35	35	35	35	35	35	35
0.3	3%	23	23	23	23	23	23	22	22	23
0.3	5%	19	19	19	19	19	19	18	18	18

資料來源：本研究。

註： P 為杉木價格，單位為元/立方公尺； P_c 為二氧化碳價格，單位為元/噸。

比較表 2 及表 3 可發現，當存在二氧化碳價格，且考慮各種碳釋放比例後，最適輪伐期會縮短。舉例而言，杉木價格為 4,363.04 元/立方公尺、實質折現率為 3% 時，沒有二氧化碳價格的最適輪伐期為 24 年，考慮二氧化碳價格及碳釋放比例之後，當二氧化碳價格為 821.49 元/噸，碳釋放比例為 1、0.7、0.3 的最適輪伐期分別為 21 年、22 年、23 年，都較不存在二氧化碳價格的最適輪伐期短。台灣地主之造林成本偏高，因此當二氧化碳價格低於某一水準，則私有地主之最適輪伐期隨著二氧化碳價格增加而縮短（註 20）。

3.2.2 木材價格固定、二氧化碳價格隨機變動之最適輪伐期

當木材價格固定為平均價格 4,363.04 元/立方公尺，而二氧化碳價格隨機變動之最適輪伐期如表 4 所示。在同一碳釋放比例下，實質折現率愈高，

最適輪伐期愈短。在同一實質折現率下，碳釋放比例對最適輪伐期的影響則較不規則。實質折現率為 1% 時，碳釋放比例愈小，最適輪伐期愈短；實質折現率為 3%，在不同的碳釋放比例下，最適輪伐期皆同為 24 年；實質折現率為 5%，碳釋放比例為 1 之最適輪伐期最長，為 21 年；其次為碳釋放比例為 0.3 時之輪伐期，為 19 年；碳釋放比例為 0.7 時之輪伐期最短，為 17 年。

表 4 木材價格固定、二氧化碳價格隨機變動之最適輪伐期

碳釋放比例 (θ)	實質折現率 (β)	最適輪伐期 (年)
1	1%	48
1	3%	24
1	5%	21
0.7	1%	42
0.7	3%	24
0.7	5%	17
0.3	1%	33
0.3	3%	24
0.3	5%	19

資料來源：本研究。

3.2.3 木材價格隨機變動、二氧化碳價格固定之最適輪伐期

當木材價格隨機變動，二氧化碳價格固定為平均價格 821.49 元/噸，最適輪伐期如表 5 所示。在同一碳釋放比例下，實質折現率愈高，最適輪伐期愈短。在同一折現率下，碳釋放比例對最適輪伐期的影響較不規則。折現率為 1%，碳釋放比例 0.7 之最適輪伐期最長，為 43 年；碳釋放比例為 1 與 0.3 之最適輪伐期同為 38 年；實質折現率為 3% 及 5%，碳釋放比例愈小，最適輪伐期愈短。由上述，木材價格隨機變動之最適輪伐期，較木材價格固定時之輪伐期來得長。

表 5 木材價格隨機變動、二氧化碳價格固定之最適輪伐期

碳釋放比例 (θ)	實質折現率 (β)	最適輪伐期 (年)
1	1%	38
1	3%	29
1	5%	23
0.7	1%	43
0.7	3%	28
0.7	5%	19
0.3	1%	38
0.3	3%	25
0.3	5%	18

資料來源：本研究。

註：二氧化碳價格(P_c) (元/噸) =821.49 (元/噸)。

3.2.4 木材價格隨機變動、二氧化碳價格隨機變動之最適輪伐期

如表 6，當木材價格隨機變動，且二氧化碳價格亦隨機變動時，最適輪伐期介於 16 年至 44 年之間。實質折現率增加，或碳釋放比例降低，均會使最適輪伐期縮短。由上述，二氧化碳與木材價格同時隨機變動時之最適輪伐期，較兩價格固定時所決定之輪伐期來得長。

表 6 木材價格隨機變動、二氧化碳價格隨機變動之最適輪伐期

碳釋放比例 (θ)	實質折現率 (β)	最適輪伐期 (年)
1	1%	44
1	3%	25
1	5%	23
0.7	1%	38
0.7	3%	24
0.7	5%	20
0.3	1%	37
0.3	3%	23
0.3	5%	16

資料來源：本研究。

3.2.5 四種情境之比較分析

本研究進一步比較上述四種情境(註 21)，當折現率固定為百分之三時，不同的碳釋放比例為 100%、70%及 30%之地主最適輪伐期如表 7、表 8 及表 9 所示。本研究將最適輪伐期之模擬情境分成四種，包括：(1) 木材價格固定、二氧化碳價格固定；(2) 木材價格固定、二氧化碳價格隨機變動；(3) 木材價格隨機變動、二氧化碳價格固定；(4) 木材價格隨機變動、二氧化碳價格隨機變動。透過本研究之模擬結果發現，在四種情境下，木材價格隨機變動，而二氧化碳價格固定情境之最適輪伐期最長，此結果與 Chladná (2007) 相同；另外本研究亦發現，當其中一價格變數由固定調整為隨機變動時，其輪伐期將比兩價格變數均固定下來得長，然而當木材價格與二氧化碳價格均為隨機變動時，則最適輪伐期不一定較兩價格變數來得長，此結論亦與 Chladná (2007) 相同。整體而言，本研究透過台灣杉木資料模擬結果顯示結論與 Chladná (2007) 大致相同，所不同之處為，本研究之模擬結果中，最短的輪伐期為木材價格與二氧化碳價格均為固定之情境，而 Chladná (2007) 之模擬結果中，其最短之輪伐期為木材價格固定而二氧化碳價格隨機變動之情境(註 22)。

表 7 四種情境之最適輪伐期比較(碳釋放比例 = 100%)

木材價格(P)	二氧化碳價格(P_c)	碳釋放比例(θ)	實質折現率(β)	最適輪伐期(年)
固定常數	固定常數	1	3%	21
固定常數	隨機變動	1	3%	24
隨機變動	固定常數	1	3%	29
隨機變動	隨機變動	1	3%	25

資料來源：本研究。

註：杉木價格(P)為固定常數時，其值為 4,363.04 (元/立方公尺)；二氧碳價格(P_c)為固定常數時，其值為 821.49 (元/噸)。

表 8 四種情境之最適輪伐期比較 (碳釋放比例 = 70%)

木材價格 (P)	二氧化碳價格 (P_c)	碳釋放比例 (θ)	實質折現率 (β)	最適輪伐期(年)
固定常數	固定常數	0.7	3%	22
固定常數	隨機變動	0.7	3%	24
隨機變動	固定常數	0.7	3%	28
隨機變動	隨機變動	0.7	3%	24

資料來源：本研究。

註：杉木價格 (P) 為固定常數時，其值為 4,363.04 (元/立方公尺)；二氧化碳價格 (P_c) 為固定常數時，其值為 821.49 (元/噸)。

表 9 四種情境之最適輪伐期比較 (碳釋放比例 = 30%)

木材價格 (P)	二氧化碳價格 (P_c)	碳釋放比例 (θ)	實質折現率 (β)	最適輪伐期(年)
固定常數	固定常數	0.3	3%	23
固定常數	隨機變動	0.3	3%	24
隨機變動	固定常數	0.3	3%	25
隨機變動	隨機變動	0.3	3%	23

資料來源：本研究。

註：杉木價格 (P) 為固定常數時，其值為 4,363.04 (元/立方公尺)；二氧化碳價格 (P_c) 為固定常數時，其值為 821.49 (元/噸)。

IV、結論與建議

在傳統之淨現值法假設下，地主決定最適輪伐期時通常沒有考慮環境的變動與不確定性因素，因此可能會錯估造林之淨現值，因此將外在環境的不確定性納入模型中，可提供投資者較精確且具彈性的評估結果。

台灣目前並沒有碳價格存在，但為因應國際溫室氣體減量，未來可能建立的相關二氧化碳價格機制下，二氧化碳價格波動對地主之影響是值得關注

的問題。基於此，本研究在考慮森林的最適輪伐期時，除引用 Chladná (2007) 不確定性模型之外，並考慮木材價格與二氧化碳價格兩變數不確定之情況，建立考慮兩變數不確定下之森林最適輪伐期模型，並以我國地主種植杉木為例，實證模擬地主在面對木材價格不確定與二氧化碳價格不確定下之最適輪伐期，並對於木材價格確定與不確定以及二氧化碳價格確定與不確定等交叉組合共四種情形下之最適輪伐期進行比較分析，以作為未來政府制訂相關二氧化碳管理機制之政策參考。本研究考慮四種情境，包括 (1) 杉木價格固定、二氧化碳價格固定；(2) 杉木價格固定、二氧化碳價格隨機變動；(3) 杉木價格隨機變動、二氧化碳價格固定；以及 (4) 杉木價格隨機變動、二氧化碳價格隨機變動等四種狀況。本研究之主要結果如下：

1. 杉木價格與二氧化碳價格固定時，我國地主在存在有二氧化碳價格時之最適輪伐期比不存在二氧化碳價格時之輪伐期短，主要是因為二氧化碳價格過低所致。
2. 杉木價格與二氧化碳價格固定時，我國杉木之最適輪伐期為 21 年，而考慮任一價格隨機變動時，其最適輪伐期均會比價格固定下之輪伐期長，其中以杉木價格變動造成輪伐期增加之影響較為顯著。例如考慮杉木價格變動，則最適輪伐期增加為 29 年；考慮二氧化碳價格變動，則輪伐期增加為 24 年；考慮兩種價格均隨機變動下，則輪伐期增加為 25 年。
3. 當考慮折現率變動下，則無論杉木價格與二氧化碳價格變動與否，折現率越高，則最適輪伐期均會愈短。
4. 考慮杉木價格隨機變動而二氧化碳價格固定時，則當折現率為 3% 以上時，碳釋放比例愈小，則最適輪伐期愈短。當杉木價格與二氧化碳價格均隨機變動時，則隨著碳釋放比例愈小，最適輪伐期亦愈短。

附 註

1. 我國目前尚未有具體的森林碳吸存交易制度，不過我國已有碳排放權交易公司之成立，從事碳的買賣仲介工作。例如苗栗縣政府所轄之苗能實業股份有限公司在 2008 年 6 月 15 日正式掛牌，從事碳權交易等事業，並委託透過台灣碳排放交易推廣協會，加入聯合國溫室氣體組織（United Nations Framework Convention on Climate Change，以下簡稱 UNFCCC），具備國際交易碳權資格，且已經有在中國買碳權賣到英國的經驗（林國慶，2008）。
2. 同林齡的人工林都有一定的造林時期與伐採時期，從造林開始到林木伐採更新為止所經歷的時期，稱為輪伐期。因此林地上的林木被連續兩次伐採所相隔的時間稱之為「森林輪伐期」。
3. 本研究之理論模型中的碳價格，是較為一般性的概念，並不限定由碳交易而產生的碳價格，可能是碳交易得到的碳收入，可能是政府提供補貼而得到的碳收入，亦可能是碳排放廠商認養森林而支付給林農的碳價格。換言之，包括課稅、補貼與成本分擔各項措施中針對碳吸存所訂定的給付價格，本研究皆稱為碳價格（Carbon Price），此價格為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。
4. 如 Samuelson（1976）所提出計算森林輪伐期的方法，即極大化每年可由土地回收的地租以作為決定輪伐期的準則。Hartman（1976）是最早將木材收益以外的價值考慮進最適輪伐期模型之學者，以 Faustmann 的模型為基礎，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。
5. 相關文獻可參考 Morck *et al.*（1989）與 Insley 與 Rollins（2002、2004）等。
6. 在 1980 年後，風險與不確定性分析及隨機市場的影響成為研究的焦點。由於現實生活中，許多因素並非固定而為波動，許多因素的隨機波動將影響地主之砍伐決策以及影響砍伐的時點。Lembersky 與 Johnson（1975）及 Brock *et al.*（1982）為最早提出用不確定因子來分析地主之森林經營管理決策行為之研究。Lembersky 與 Johnson 在 1975 年分析地主面對未來木材市場的不確定之最適投資與管理決策，其不確定性的因子服從馬可夫過程，包括平均材積、存量等之因子，但作者提到此研究僅適用於研究之觀察期間（即林齡較小之杉木）。另外

Miller 與 Voltaire (1980) 則僅是假設林木的生長為一動態過程，且林主在給定生長過程以及已知的林木生長的狀況下決定何時伐木與再植樹。McConnell *et al.* (1983) 修正 Faustmann 模型分析木材價格與造林成本變動下的最適輪伐期模型，結果顯示輪伐期可能因此延長或縮短。若伐木後剩餘林木收入之折現值為固定，則最適輪伐期取決於重新植樹成本大小；若木材價格與造林成本為常數時所得到的結果即為 Faustmann 模型的解。

7. 就國內而言，類似的文獻則相對較少（林國慶、柳婉郁，2007a、2007b、2007c），且國內文獻均以靜態分析為主，亦未考慮木材市場環境不確定下之地主決策。
8. 本研究之重點在於同時考慮木材價格與二氧化碳兩者價格不確定下決定最適輪伐期，碳交易制度為一重要議題，但由於碳交易制度與本研究決定之最適輪伐期決定之模型為間接關係，為林農決策模型中的碳價格來源角色之一，因此，本研究並沒有對於碳交易制度之運作機制進行深入分析。
9. 木材價格波動為生活中存在之事實。
10. 由於 Chladná (2007) 是目前文獻中，唯一考慮兩變數隨機來決定最適輪伐期之文獻，因此本研究才引用此模型來作為模擬台灣資料之基礎模型，目前文獻中最多僅有兩變數同時變動之理論模型，目前尚未有文獻推導出三個以上變數同時變動之決策模型。
11. 實際的森林經營管理，應在無窮個輪伐期下進行決策才符合經濟原理，若僅考慮單一輪伐期是一種數學簡化過程，結果可能會有失偏頗。
12. 若將所有的不確定因素考慮入模型，則模型推導將會更複雜且無法求解。
13. 此(1)式表示木材價格隨時間變動，可分解為確定性變動和不確定性變動兩個部分。確定性變動的部分即市場整體的趨勢 (Drift)，受到標的物預期報酬率所影響。不確定變動的部分包括隨機運動和跳躍運動。隨機運動中，價位的分布會侷限在某一個平均值的附近，每一個價位和平均值的差距，有一定範圍的變異數，如常態分配可用平均值和變異數來表達其狀態。另外一部份是因為意外消息面的刺激，所導致的跳躍 (Jump) 運動。測度跳躍運動主要的參數是跳躍運動的幅度和出現的頻率。
14. 第(6)式之表示二氧化碳價格隨時間變動之情形，可分解為確定性和不確定性兩個部分。確定性的部分就是市場整體的趨勢 (Drift)，受到標的物的預期報酬率所影響。不確定變動的部分包括隨機運動和跳躍運動。
15. γ 為材積與二氧化碳的轉換係數， $\gamma = 0.25 \times 44 / 12 = 0.92$ 。
16. 由於台灣目前並沒有碳價格存在，未來為因應國際溫室氣體減量，可能實施碳交

易機制與碳給付機制，就台灣而言，相關機制產生「碳價格波動」對地主之影響，是重要課題，亦是值得關注與探討的問題。

17. 本研究參考 Chladná (2007) 之設定，設定此一時間序列之杉木價格資料為一平均數回歸之隨機過程，透過此設定求得相關參數。表 1 下方有兩種 R^2 值， R^2 值為迴歸式之 R 平方值，為迴歸式之調整後 R 平方值，兩者 R^2 值的確偏低。為簡化估計，本研究直接取用 Chladná (2007) 之木材價格函數設定方式，而沒有嘗試或採用其他可能的木材價格函數，許多文獻在考慮不確定價格變數時，乃採用此種的隨機過程，而將此套入台灣杉木價格資料之 R^2 值偏低，本研究推測可能是因台灣的杉木價格波動幅度不大（國內其他樹種之價格亦然），為求得同時考慮木材價格不確定與二氧化碳價格不確定之輪伐期，本研究選擇依循大部分文獻設定方式，以平均數回歸之隨機過程刻畫杉木價格不確定之情況，此亦為本研究之研究限制。
18. 木材價格與二氧化碳價格應有關連性，在木材價格與二氧化碳價格均設定為固定變數情形下，可由理論模型求出木材價格與二氧化碳價格之關係，亦可求出木材價格與二氧化碳價格介於何種範圍時，地主會選擇砍伐；木材價格與二氧化碳價格介於何種範圍時，地主會選擇繼續維持立木狀態而不砍伐。然而，若考慮木材價格與二氧化碳價格均為隨機變數時，則不易直接由模型求得木材價格與二氧化碳價格之關連性，其數學推導相當複雜（主要是同時考慮兩變數隨機變動所致），必須透過模擬實證才能瞭解其消長情形，進而分析地主砍伐決策，此亦為本研究或 Chladná (2007) 進行四種模擬情境，以及進一步對於相關重要變數進行敏感度分析之因。本研究之分析重點在於比較表 7、表 8 與表 9，即主軸仍在比較木材價格與二氧化碳價格固定與隨機變動對於輪伐期之影響。
19. 本研究蒐集 1991 年 1 月至 2007 年 12 月份的杉木價格資料，共 204 筆月價格資料。在探討木材價格固定的個案裡，木材價格取 204 筆月資料之平均值，為 4,363.05 元/立方公尺。
20. 當二氧化碳價格過低，則地主傾向提早砍伐再重新種植來領取更多的碳收入，此結論與設定的變數型態有關，牽涉層面甚多（如材積生長函數之型態、林木碳吸存函數等），例如，當林齡較大時設定之碳吸存增量趨緩，則地主傾向在林齡較小時砍伐重新種植以獲取更多碳收入。因此，本研究之「當二氧化碳價格過低，則地主傾向提早砍伐」之結論，是在本研究之變數限制下而得，非一般化模型下之結論。柳婉郁 (2008) 之研究指出，就台灣私有地主而言，當二氧化碳價格高於一定水準以上，造林地主才會隨著二氧化碳價格增加而延長最適輪伐期由此可推論，二氧化碳價格與最適輪伐期屬非線性關係，可進一步由理論模型中分析此

非線性的來源，例如來自非線性的林木生產函數或其他來源。也可用較高的二氧化碳價格作模擬，找出臨界點，亦即進行二氧化碳價格與最適輪伐期之非線性關係之模擬，找出在何種二氧化碳價格水準以上，二氧化碳價格增加會使得最適輪伐期延長，然本研究之理論模型較為複雜，故進一步的相關數理推導可作為未來進行後續研究之範疇。

21. 本研究各選擇三種釋放比率以及三種折現率來分析有其意義，並非直接採用 Chladná (2007) 之設定，分述如下：(1) 釋放比率必定介於 0% 至 100% 之間，又砍伐林木碳吸存之釋放比率為 0% 幾乎是不太可能發生，因此本研究選擇 30%、70% 與 100% 的釋放比率來進行分析。基礎情境設定為 100%，主要是大部分文獻設定地主在林木砍伐時，均考慮林木碳吸存全部釋放到大氣中（例如砍伐後燒毀），因此釋放比率為 100% 作為基礎設定。(2) Chladná (2007) 選擇奧地利該國較為合適的折現率選擇，為 1%、2%、3% 的折現率。而本研究考慮台灣之社經背景，以台灣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%，將實質折現率設定為 3%。進而以此為基礎，選擇 1%、3%、5% 的折現率來進行碳價格與木材價格確定與不確定之影響比較。
22. 本研究所引用的 Chladná (2007) 模型，為考慮兩變數隨機之一般性理論模型，本研究之主要目的並非將模擬結果與 Chladná (2007) 結果進行比較，而在於以台灣私有地主而言，考慮兩變數變動，是否會對地主輪伐期造成影響，並分析其影響之政策意涵。本研究根據台灣之林業資料所模擬出來之結果，主要政策意涵有二，一為考慮任一變數波動後，最適輪伐期將會延長，但若同時考慮兩變數波動，則最適輪伐期並不一定會延長，此與國外研究不盡相同；二為當碳價格固定之下，若碳價格不夠高，則碳價格存在可能會造成地主輪伐期縮短的現象，此亦存在重要的政策意涵。

參考文獻

- 行政院農業委員會林務局，2007。『林業（伐木業）生產成本』。台北：行政院農業委員會林務局。
- 行政院農業委員會林務局木材市價資訊系統。取自 <http://woodprice.forest.gov.tw/forest-wood/index.htm>。
- 李國忠、林俊成，2000a。「森林資源二氧化碳吸存與碳排放權交易」，『全球變遷通訊雜誌』。26 卷，14-19。
- 李國忠、林俊成，2000b。「森林資源碳吸存效果與京都議定書」，『全球變遷通訊雜誌』。23 卷，1-9。
- 林俊成、王培蓉，2006。「世界碳交易現況對臺灣森林經營之影響」，『林業研究專訊』。13 卷，1 期，14-17。
- 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（I）」。行政院農業委員會委託研究計畫。95 農科-12.2.3-務-e1。國立台灣大學農業經濟研究所。
- 林國慶，2007。「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（II）」。行政院農業委員會委託研究計畫。96 農科-7.1.5-務-e1（2）。國立台灣大學農業經濟研究所。
- 林國慶，2008。「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（III）」。行政院農業委員會委託研究計畫。97 農科-7.2.1-務-e1（2）。國立台灣大學農業經濟研究所。
- 林國慶、柳婉郁，2007a。「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。
- 林國慶、柳婉郁，2007b。「台灣在京都機制下排放減量權證需求與供給之經濟分析」，發表於第八屆全國實證經濟學論文研討會。台南：國立成功大學。2007 年 5 月 5 日。
- 林國慶、柳婉郁，2007c。「國內森林資源碳排放交易價格之經濟分析」，發表於環境資源經濟、管理暨系統分析學術研討會。台北：國立台北大學。2007 年 9 月 14 日。

- 柳婉郁, 2004。「最適造林獎勵金之研究」。碩士論文, 國立台灣大學農業經濟研究所。
- 柳婉郁, 2008。「私有地主參與碳匯方案與機制之經濟分析」。博士論文, 國立台灣大學農業經濟研究所。
- 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、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。
- 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.
- Braze, R. J. and R. Mendelsohn, 1988. "Timber Harvesting with Fluctuating Prices," *Forest Science*. 34(2): 359-372.
- Brock, W. A., M. Rothschild, and J. E. Stiglitz, 1982. "Stochastic Capital Theory: I. Comparative Statistics," Technical Paper 23, Technical Paper Series National Bureau of Economic Research, Cambridge.
- Cacho, O. J., R. L. Hean, and R. M. Wise, 2003. "Carbon-Accounting Methods and Reforestation Incentives," *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*. 47(2): 153-179.
- Chladná, Z., 2007. "Determination of Optimal Rotation Period under Stochastic Wood and Carbon Prices," *Forest Policy and Economics*. 9(8): 1031-1045.
- Dixit, A. K. and R. S. Pindyck, 1994. *Investment under Uncertainty*. New Jersey: Princeton University Press.
- Englin, J. E. and M. S. Klan, 1990. "Optimal Taxation: Timber and Externalities," *Journal of Environmental Economics and Management*. 18(3): 263-275.
- Faustmann, M., 1849. "Calculation of the Value Which Forest Land and Immature Stands Possess for Forestry," Reprint, 1995, *Journal of Forest Economics*. 1(1): 7-44.
- Guthrie, G. A. and D. K. Kumareswaran, 2007. "Carbon Subsidies, Taxes and Optimal Forest Management," Working Paper, Social Science Research Network.

- Haight, R. G. and T. P. Holmes, 1991. "Stochastic Price Models and Optimal Tree Cutting: Results for Loblolly Pine," *Natural Resource Modeling*. 5(4): 423-443.
- Hartman, R, 1976. "The Harvesting Decision When a Standing Forest Has Value," *Economic Inquiry*. 14(1): 52-58.
- Inslay, M. C. and K. Rollins, 2002. "Real Options in Harvesting Decisions on Publicly Owned Forest Lands," Working paper, May. 2002.
- Inslay, M. C. and K. Rollins, 2004. "On Estimating the Costs of Regulations Limiting Flexibility in Timber Harvest Decision: A Multi-Rotational Real Options Model," Discussion paper.
- Lembersky, M. R. and K. N. Johnson, 1975. "Optimal Policies for Managed Stands: An Infinite Horizon Markov Chain Decision Process Approach," *Forest Science*. 21(2): 109-122.
- Lewandrowski, J., H. McDowell, R. R. House, and M. Peters, 2000. "Mitigation Greenhouse Gas Emission: Implications of the Kyoto Protocol for U.S. Agriculture and U.S. Agricultural Policy," *World Resource Review*. 12: 126-48.
- McConnell, K. E., J. N. Daberkow, and I. W. Hardie, 1983. "Planning Timber Production with Evolving Prices and Costs," *Land Economics*. 59(3): 292-299.
- Miller, R. A. and K. Voltaire, 1980. "A Sequential Stochastic Tree Problem," *Economics Letters*. 5(2): 135-140.
- Morck, R., E. Schwartz, and D. Stangeland, 1989. "The Valuation of Forestry Resources under Stochastic Prices and Inventories," *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*. 24(4): 473-487.
- 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.
- 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.

Samuelson, P. A., 1976. "Economics of Forestry in An Evolving Society," *Economic Inquiry*. 14(4): 466-492.

Sohngen, B. and R. Mendelsohn, 2003. "An Optimal Control Model of Forest Carbon Sequestration," *American Journal of Agricultural Economics*. 85(2): 448-457.

Thomson, T. A., 1992. "Optimal Forest Rotation When Stumpage Prices Follow a Diffusion Process," *Land Economics*. 68(3): 329-342.

Van Kooten, G. C., 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 Agriculture Economics*. 77: 365-374.

Measuring the Optimal Rotation Period under Carbon Price and Timber Price Uncertainty

Wan-Yu Liu^{*}, Yu-Ming Lu^{**}, and Kuo-Ching Lin^{***}

*Countries around the world start to focus on forest carbon sequestration as a policy instrument of CO₂ emission reduction. It becomes a trend of controlling GHG emission that changing some parts of agricultural land into forest land to increase carbon sequestration. This research considers how different carbon release proportion affects the rotation length. The empirical results are summarized as follows: (1) When the prices of *cunnighania lanceolata* and carbon dioxide are fixed, while the price of carbon dioxide is existed, the optimal rotation becomes shorter, it is because that the price of carbon dioxide is too low. (2) When the prices of *cunnighania lanceolata* and carbon dioxide are fixed, the optimal rotation period of *cunnighania lanceolata* in Taiwan is 21 years. When either the prices of timber or carbon dioxide fluctuates randomly, the optimal rotation period will become longer than that of fixed price one. (3) If the discount rate increases, the optimal rotation period will become shorter, whether the prices of *cunnighania lanceolata* and carbon fluctuate randomly or not. (4) When the price of *cunnighania lanceolata* fluctuates randomly and the price of carbon dioxide is fixed, while the discount rate is above 3%, if the carbon release proportion becomes lower, the optimal rotation period will become shorter. Then, when both the prices of *cunnighania lanceolata* and carbon dioxide fluctuate randomly, the optimal rotation period will become shorter if the carbon release proportion becomes lower.*

Keywords: Optimal rotation period, Carbon price, Carbon sequestration, Uncertainty

* Assistant Professor, Department of Applied Natural Resources, Aletheia University.
** Master, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University.
*** Professor, Department of Agricultural Economics, National Taiwan University.
(Corresponding Author)